



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2015

**DIANA VIZINHO
ROCHA**

**ARGAMASSAS DE CIMENTO ROMANO UTILIZADAS
EM EDIFÍCIOS DO INÍCIO DO SÉCULO XX**



**DIANA VIZINHO
ROCHA**

**ARGAMASSAS DE CIMENTO ROMANO UTILIZADAS
EM EDIFÍCIOS DO INÍCIO DO SÉCULO XX**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica da Doutora Slávka Carvalho Andrejkovičová, Investigadora Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Maria Clara de Carvalho Pimenta do Vale
Professora Auxiliar da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Embora a presente dissertação seja o resultado de um trabalho individual é, na verdade, o resultado de um conjunto de ensinamentos que fui colecionando no decorrer deste processo de aprendizagem. Quero assim apresentar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho, em particular:

À professora Doutora Ana Velosa pela sua orientação, disponibilidade, apoio, sugestões e partilha de conhecimentos, tendo acreditado em mim desde o início deste projeto.

À investigadora Doutora Slávka Carvalho Andrejkovičová pela sua coorientação, incentivo, estímulo, partilha de conhecimento e constante acompanhamento do trabalho realizado. Não poderia deixar de elogiar a sua simpatia e paciência e o à vontade com que sempre me recebeu e tratou.

À engenheira Maria Carlos e ao senhor Vitor Rodrigues, por todos os esclarecimentos, disponibilidade e apoio prestados no laboratório. Um obrigado pela experiência que partilharam comigo e pela boa disposição que me permitiu um bom ambiente de trabalho.

Ao engenheiro António Mesquita, pela disponibilidade, pela partilha de conhecimento e por me ter facultado informação importante para o enquadramento teórico do presente estudo.

À Cláudia, à Raquel, ao Moisés e ao Marco pelo seu apoio incansável em especial nesta ultima fase.

Aos meus amigos de sempre, os que me acompanharam desde o início do meu percurso académico. Um muito obrigada pela vossa amizade ao longo destes bons anos.

Ao meu namorado, Tiago, por todo o carinho, paciência e apoio prestados, estando sempre a meu lado.

À minha irmã, Bárbara, pelo carinho, ajuda e apoio, que sempre acreditou em mim, incentivando nos momentos de menor ânimo.

Por fim, o meu profundo agradecimento aos meus pais, Carmen e José Carlos, pelo seu amor, amizade incondicional, compreensão, carinho e paciência. Obrigada pelo apoio que sempre demonstraram e estimularam, muitas das vezes abdicando de si.

palavras-chave

cimento romano, cimento natural, ligantes, argamassas, caracterização de argamassas, revestimentos antigos, conservação

resumo

A conservação e a reabilitação têm vindo a assumir uma maior importância, afirmando-se como uma alternativa à construção de novos edifícios e como uma solução de reabilitação do património edificado.

O cimento romano foi um dos principais materiais utilizados para revestir as fachadas de edifícios do século XIX e início do século XX. No entanto, com o surgimento de novos materiais este caiu em desuso e a falta de conhecimento sobre este material levou à utilização de ligantes inadequados na conservação destes edifícios. Desta forma, o cimento romano apresenta agora um novo interesse para a reabilitação, uma vez que deve ser sempre considerada a compatibilidade e a semelhança dos materiais.

A presente dissertação estuda o comportamento de argamassas à base de cimento romano, recorrendo a diferentes ligantes e traços volumétricos e realizando provetes de argamassas. Neste contexto, foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais que permitiram a caracterização das matérias-primas utilizadas na produção das argamassas. Posteriormente, para que fosse possível obter uma comparação efetiva das argamassas em estudo, os provetes realizados foram submetidos a testes laboratoriais, sendo determinadas as principais características dos provetes ensaiados.

Os dados obtidos indicam as tendências comportamentais das argamassas estudadas, permitindo avaliar o comportamento destas para a conservação e reabilitação de edifícios antigos e colmatando a falta de informação existente sobre as argamassas de cimento romano.

keywords

roman cement, natural cement, binders, mortars, characterization of mortars, old renders, conservation

abstract

Rehabilitation and conservation have been assuming a greater importance, affirming themselves as an alternative to construction of new buildings and as a solution of rehabilitation of the built heritage.

Roman cement was one of the main materials used to coat the facades of buildings in 19th and 20th century. However, with the discovery of new materials, it has fallen into the disuse and the lack of knowledge about this material led to the use of inappropriate binders in the conservation of these buildings. In this way, roman cement presents nowadays a new interest to rehabilitation, since it must always be considered compatibility and similarity of materials.

This dissertation studies the behaviour of mortars based on roman cement, using different binders and volumetric features and performing mortar specimens. In this context, it was carried out a set of laboratory tests which allowed the characterization of raw materials used for mortars production. Posteriorly, in order to obtain an effective comparison of mortars in study, the specimens performed were submitted to the laboratory tests, being determined the main characteristics of tested specimens.

The data obtained indicate behaviour tendencies of the mortars studied, allowing to evaluate their behaviour in relation to rehabilitation and conservation of ancient buildings and allowing closing the gap on existing information about roman cement mortars.

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	I
Índice de Figuras	IV
Índice de Tabelas	X
Índice de Equações	XI
Símbolos, Siglas e Abreviaturas	XII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura e organização da dissertação	4
2. História do Cimento Romano	7
2.1. Argamassas históricas	9
2.2. Desenvolvimento da indústria do cimento romano	9
2.3. Uso e aplicação de cimentos romanos	12
2.3.1. Formulação de argamassas	12
2.3.2. Rebocos	13
2.3.3. Moldagem de elementos arquitetónicos e decorativos	13
2.3.4. Trabalhos de pormenorização	14
2.4. Construções em cimento romano	14
3. Produção de Cimento Romano	17
3.1. Processo de produção	19
3.2. Locais de produção de cimento romano	20
3.3. Produção de cimento romano em Portugal	22
3.3.1. Fábrica de Maceira	22
3.3.2. Fábrica da Rasca	23
3.4. Normalização do cimento romano	24
4. Comportamento e Características do Cimento Romano	27
4.1. Composição química	29
4.2. Hidratação	31
4.3. Cimento Romano Versus Cimento Portland	31
4.4. Propriedades das argamassas de cimento romano	32
4.4.1. Argamassas para elementos moldados	32
4.4.2. Argamassas para reboco	32

4.4.3.	Argamassas bastardas para reboco	33
4.4.4.	Porosidade	33
4.4.5.	Retração.....	33
5.	Aplicação do Cimento Romano na Conservação	35
5.1.	Conservação e restauro do património construído	37
5.1.1.	Aplicação em edifícios históricos	37
5.1.2.	Novas áreas de aplicação.....	40
5.2.	Projetos de investigação sobre cimentos romanos	41
6.	Procedimento Experimental	43
6.1.	Formulação de argamassas de substituição	45
6.2.	Descrição do plano de ensaios	48
6.2.1.	Plano de ensaios	48
6.2.2.	Sistema de identificação e produção dos provetes	49
6.3.	Procedimentos experimentais para caracterização de matérias-primas	50
6.3.1.	Determinação da massa volúmica aparente seca.....	51
6.3.2.	Análise de fluorescência de raios-X (FRX)	51
6.3.3.	Análise de difração de raios-X (DRX)	52
6.3.4.	Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM)	53
6.4.	Procedimentos experimentais no estado fresco.....	53
6.4.1.	Produção de argamassas.....	54
6.4.1.1.	Amassadura de argamassas	54
6.4.1.2.	Ensaio de consistência por espalhamento	55
6.4.1.3.	Determinação da percentagem de água de amassadura	57
6.4.2.	Moldagem, cura e desmoldagem de provetes	57
6.5.	Procedimentos experimentais no estado endurecido.....	60
6.5.1.	Ensaio de resistência à tração por flexão	60
6.5.2.	Ensaio de resistência à compressão.....	62
6.5.3.	Determinação da profundidade de carbonatação	63
6.5.4.	Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	64
6.5.5.	Ensaio de permeabilidade ao vapor de água	65
6.5.6.	Análise de difração de raios-X (DRX)	67
6.5.7.	Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM)	68
7.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	69
7.1.	Procedimentos experimentais para caracterização de matérias-primas	71
7.1.1.	Análise visual	71

7.1.2.	Determinação da massa volúmica aparente seca	71
7.1.3.	Análise química por fluorescência de raios-X (FRX)	72
7.1.4.	Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX).....	74
7.1.5.	Análise microscópica por microscopia eletrônica de varrimento (SEM)....	78
7.2.	Procedimentos experimentais no estado fresco	82
7.2.1.	Determinação da percentagem de água de amassadura.....	82
7.3.	Procedimentos experimentais no estado endurecido	84
7.3.1.	Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX).....	84
7.3.2.	Análise microscópica por microscopia eletrônica de varrimento (SEM)....	94
7.3.3.	Análise da resistência à tração por flexão	103
7.3.3.1.	Influência do tipo de argamassa	104
7.3.3.2.	Influência da introdução de cinzas de cortiça.....	107
7.3.3.3.	Influência de retardador de presa.....	108
7.3.4.	Análise da resistência à compressão.....	110
7.3.4.1.	Influência do tipo de argamassa	111
7.3.4.2.	Influência da introdução de cinzas de cortiça.....	115
7.3.4.3.	Influência da introdução de retardador de presa.....	116
7.3.5.	Análise da profundidade de carbonatação	118
7.3.5.1.	Influência do tipo de argamassa	120
7.3.5.2.	Influência da introdução de cinzas de cortiça.....	122
7.3.5.3.	Influência da introdução de retardador de presa.....	124
7.3.6.	Análise da absorção de água por capilaridade.....	125
7.3.6.1.	Influência do tipo de argamassa	126
7.3.6.2.	Influência da introdução de cinzas de cortiça.....	130
7.3.6.3.	Influência da introdução de retardador de presa.....	132
7.3.7.	Análise da permeabilidade ao vapor de água	133
8.	Conclusões.....	139
	Referências Bibliográficas.....	143
	Anexos.....	151
	Anexo I.....	153
	Análise de difração de raios-X (DRX) em amostras de Cimento Natural Marfil	153
	Anexo II.....	156
	Análise de difração de raios-X (DRX) em amostras de Cimento Natural Tigre.....	156
	Anexo III.....	160
	Tabela comparativa final I.....	160
	Tabela comparativa final II	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Túnel construído sob o rio Tamisa: a) imagem da época b) imagem atual	12
Figura 2. Exemplo de elementos decorativos em janelas da Antiga Academia do Comércio, em Cracóvia, Polónia	13
Figura 3. Moldagem de cornija	14
Figura 4. Exemplos de construções em cimento romano: a) Escola municipal, Cracóvia, Polónia b) Colégio da Agricultura, Cracóvia, Polónia c) Casa “Sob a Aranha”, Cracóvia, Polónia.....	15
Figura 5. Teatro Nacional São João, Porto.....	15
Figura 6. Exemplo de forno de eixo vertical utilizado para calcinação de cimento romano.....	19
Figura 7. Alteração da composição de um cimento romano com a temperatura	30
Figura 8. Edifício datado de 1873, em Viena, Austria. Fachada com uma combinação de tijolo, pedra e argamassa de cimento romano, preservada no seu estado original, envelhecida naturalmente	38
Figura 9. Restauro de elementos decorativos da Estação da Eletricidade, em Cracóvia, Polónia.....	39
Figura 10. Exemplos de técnicas de limpeza de fachadas de cimento romano	40
Figura 11. Provetes cilíndricos.....	50
Figura 12. Provetes prismáticos	50
Figura 13. Registo fotográfico de análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM).....	53
Figura 14. Embalagens de saco dos cimentos naturais utilizados	54
Figura 15. Mistura dos componentes secos.....	54
Figura 16. Processo de amassadura de argamassas	55
Figura 17. Mesa de espalhamento com molde tronco-cónico	56
Figura 18. Processo de determinação de consistência por espalhamento	57
Figura 19. Aplicação de óleo descofrante no interior dos moldes	58
Figura 20. Moldagem de provetes prismáticos	58
Figura 21. Moldagem de provetes cilíndricos	59
Figura 22. a) Desmoldagem de provetes; b) Condicionamento de provetes a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $95\% \pm 5\%$ de humidade relativa	59

Figura 23. Exemplo de identificação de argamassas e provetes.....	60
Figura 24. Registo fotográfico de ensaio de resistência à tração por flexão	61
Figura 25. Registo fotográfico de ensaio de resistência à compressão	62
Figura 26. Registo fotográfico de determinação de profundidade de carbonatação: a) aspeto de provetes carbonatados e não-carbonatados; b) medição da profundidade de carbonatação.....	63
Figura 27. Registo fotográfico do ensaio de absorção de água por capilaridade	64
Figura 28. Equipamento utilizado em ensaio de permeabilidade ao vapor de água.....	65
Figura 29. Preparação de solução salina de nitrato de potássio (KNO_3).....	66
Figura 30. Preparação de conjunto para ensaio de permeabilidade ao vapor.....	66
Figura 31. Conjuntos armazenados em câmara climática	67
Figura 32. Preparação de amostras para DRX.....	68
Figura 33. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX).....	75
Figura 34. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX).....	76
Figura 35. a) e b) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; c) Espectro EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectro EDS da zona Z2 identificada na micrografia.....	79
Figura 36. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS	79
Figura 37. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia.....	80
Figura 38. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia.....	80
Figura 39. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia.....	81
Figura 40. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z3 identificada na micrografia	81
Figura 41. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 1	84
Figura 42. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 2	85
Figura 43. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 10	86

Figura 44. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 11	86
Figura 45. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 3	87
Figura 46. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 4	88
Figura 47. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 5	88
Figura 48. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 6	89
Figura 49. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 7	90
Figura 50. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 8	90
Figura 51. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 9	90
Figura 52. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 26	92
Figura 53. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 27	93
Figura 54. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 28	93
Figura 55. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 1; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia	95
Figura 56. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 1; b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia	95
Figura 57. a) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 1; b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia	96
Figura 58. a) e b) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 10; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia	97
Figura 59. a), b) e c) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 3; d) Espectros de EDS	98
Figura 60. a) e b) Micrografia de microscopia eletrónica de varrimento referente à amostra da argamassa 12; c) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia	99

Figura 61. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 19; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia	100
Figura 62. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 19; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia	101
Figura 63. a), b) e c) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 26; d) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia.....	102
Figura 64. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I	104
Figura 65. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I	105
Figura 66. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I.....	106
Figura 67. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça	108
Figura 68. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador	109
Figura 69. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador	110
Figura 70. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I	112
Figura 71. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I	113
Figura 72. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I.....	114
Figura 73. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça	116
Figura 74. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador	117
Figura 75. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador	118
Figura 76. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I.....	120
Figura 77. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I.....	121

Figura 78. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I	122
Figura 79. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça	123
Figura 80. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador	124
Figura 81. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador	125
Figura 82. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I.....	127
Figura 83. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I.....	128
Figura 84. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I.....	129
Figura 85. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça	131
Figura 86. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador	132
Figura 87. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador	133
Figura 88. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I	135
Figura 89. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I.....	136
Figura 90. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I.....	137
Figura A.I. 1. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 12	153
Figura A.I. 2. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 13	153
Figura A.I. 3. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 14	154

Figura A.I. 4. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 15	154
Figura A.I. 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 16	155
Figura A.I. 6. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 17	155
Figura A.I. 7. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 18	155
Figura A.II. 1. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 19	156
Figura A.II. 2. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 20	157
Figura A.II. 3. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 21	157
Figura A.II. 4. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 22	158
Figura A.II. 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 23	158
Figura A.II. 6. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 24	158
Figura A.II. 7. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 25	159

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Formulações efetuadas, com respetivas designações e traços volumétricos	47
Tabela 2. Massa volúmica aparente seca dos materiais utilizados	72
Tabela 3. Resultados obtidos por FRX de amostras dos materiais utilizados	72
Tabela 4. Resultados obtidos por FRX de amostra de cinzas de cortiça	74
Tabela 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX)	74
Tabela 6. Formulações efetuadas, com respetivas percentagens de água de amassadura	82
Tabela 7. Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão das diferentes formulações	103
Tabela 8. Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão das diferentes formulações	111
Tabela 9. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação	119
Tabela 10. Resultados obtidos para os coeficientes de capilaridade	126
Tabela 11. Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade ao vapor	134
Tabela A.III. 1. Resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão, resistência à compressão e profundidade de carbonatação	160
Tabela A.III. 2. Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água	162

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1. Resistência à flexão	61
Equação 2. Resistência à compressão	63

SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

Materiais

CL	Cal Cálcea
NHL	Cal Hidráulica Natural
CEM I	Cimento Portland

Unidades

%	Porcentagem
°C	Grau Centígrado ou Celsius
g	Grama
Kg	Quilograma
s	Segundo
h	Hora
h^{0,5}	Raiz quadrada da hora
m	Metro
m²	Metro quadrado
m³	Metro cúbico
cm	Centímetro
mm	Milímetro
mm²	Milímetro quadrado
mm³	Milímetro cúbico

μm	Micrómetro
MPa	Megapascal
N	Newton
KN	Quilonewton

Ensaaios e determinações

FRX	Fluorescência de raios-X
DRX	Difração de raios-X
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento
NP	Norma Portuguesa
EN	Norma Europeia, do inglês European Norm
ICDD	International Center for Diffraction Data
PVC	Policloreto de vinilo
Rf	Resistência à tração por flexão
Rc	Resistência à compressão
pH	Potencial de hidrogénio
μ	Coefficiente de resistência à difusão de vapor de água
Wpv	Permeabilidade ao vapor de água

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A riqueza e a grande diversidade de materiais existentes nas fachadas de edifícios históricos levam-nos a reconhecer uma crescente necessidade de conservar e reabilitar estes edifícios (Margalha, 2011).

A reabilitação e a conservação afirmam-se atualmente como importantes soluções na construção civil, tornando-se setores importante para a Europa e tendo-se registado em Portugal um aumento do interesse nestes setores por parte da sociedade e também do Estado. No entanto, ao observarmos o património edificado Português verificamos que essa necessidade de reabilitação nem sempre tem sido reconhecida, encontrando-se grande parte deste em estado de degradação.

Analisando os revestimentos de edifícios antigos é possível conhecer parte da nossa história, nomeadamente materiais e tecnologias utilizados em determinada época. No entanto, a importância dos revestimentos dos edifícios históricos nem sempre é reconhecida.

O cimento romano foi o principal material utilizado para revestir as fachadas de edifícios do século XIX e início do século XX. Durante este período deu-se um rápido crescimento urbano que ainda hoje desempenha um importante papel na maioria das grandes cidades europeias. Com o surgimento de novos materiais este caiu em desuso e a falta de conhecimento sobre este material levou à utilização de ligantes inadequados na conservação destes edifícios.

Assim, quase um século após a sua recessão na primeira metade do século XX, estes ligantes apresentam agora um novo interesse para a reabilitação, uma vez que deve sempre ser considerada a compatibilidade e a semelhança dos materiais, tentando manter a aparência original e respeitando os valores históricos.

Face ao exposto e no sentido de completar os estudos existentes, apresenta-se a seguinte dissertação sobre argamassas de cimento romano em edifícios do início do século XX.

1.2. Objetivos

Sendo importante que a identidade do património edificado se mantenha, a presente dissertação surge com o intuito de colmatar a falta de informação existente sobre alguns revestimentos históricos, nomeadamente revestimentos cujo ligante é o cimento romano.

Serão assim formuladas argamassas de substituição, baseando-se o seu estudo em análises laboratoriais que contemplem a caracterização química e mineralógica com ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrónica de varrimento (SEM). Pretende-se também uma caracterização física e mecânica das argamassas, recorrendo a ensaios de resistência à flexão e à compressão, profundidade de carbonatação, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água.

Para além dos resultados individuais de cada característica de desempenho, pretende-se estabelecer correlações entre eles. Também é intenção que se perceba a influência de alguns fatores, tais como tipo de argamassa, a introdução de cinzas de cortiça e a introdução de um retardador de presa.

Através deste estudo pretende-se assim fazer abordagem à utilização e produção de cimento romano em Portugal, estabelecendo bases (materiais, traços) para a formulação de argamassas a utilizar na conservação do património edificado Português.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 8 capítulos, nomeadamente: introdução, história do cimento romano, produção de cimento romano, comportamento e características do cimento romano, aplicação de cimento romano na conservação, procedimento experimental, apresentação e discussão de resultados e, por fim, conclusões.

O capítulo 1 introduz um enquadramento ao tema da dissertação, encontrando-se este capítulo dividido em um breve enquadramento histórico, os objetivos a alcançar, a metodologia de investigação a desenvolver e o modo como a dissertação se encontra estruturada e organizada.

Os capítulos 2, 3, 4 e 5 baseiam-se numa pesquisa bibliográfica em que o cimento romano é o tema principal. O capítulo 2 desenvolve uma breve parte histórica sobre o cimento romano, abrangendo informação sobre argamassas históricas, o desenvolvimento da indústria do

cimento romano, uso, aplicações e construções com recurso ao mesmo. O capítulo 3 baseia-se em informação sobre a produção de cimento romano, sendo referidos os processos e locais de fabrico, passando por uma abordagem sobre os possíveis locais de fabrico deste cimento em Portugal. No capítulo 4 é feita uma abordagem ao comportamento, desempenho e características do cimento romano, aprofundando informações acerca da composição química, hidratação e propriedades das argamassas baseadas neste ligante. Por fim, o capítulo 5 encontra-se dividido em duas partes, apresentando informações sobre conservação e restauro do património construído e projetos de investigação sobre este tipo de cimento.

O capítulo 6 caracteriza a atividade experimental, sendo inicialmente referidos os materiais a utilizar neste estudo e sintetizado um plano de ensaios e um sistema de identificação dos provetes. É também neste capítulo que são indicadas as formulações a estudar e descritos todos os procedimentos laboratoriais de caracterização das matérias-primas, das argamassas no estado fresco e das argamassas no estado endurecido.

No capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados da atividade experimental, sendo comparados os resultados obtidos para as diferentes argamassas analisadas, considerando também parâmetros como a introdução de cinzas de cortiça e de retardador de presa. É de referir que se tentam estabelecer correlações entre os diferentes parâmetros estudados, tentando dar resposta aos objetivos desta dissertação.

O capítulo 8 inclui as conclusões do trabalho desenvolvido numa tentativa de responder aos objetivos propostos, sendo também apresentadas notas importantes para trabalhos futuros que possam aprofundar o presente estudo realizado.

Por fim apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no decorrer desta dissertação. De modo a complementar o Capítulo 7, encontram-se em anexo alguns resultados obtidos na análise de difração de raios-X.

Capítulo 2

História do Cimento Romano

2. HISTÓRIA DO CIMENTO ROMANO

2.1. Argamassas históricas

A argamassa é um material construtivo, cuja utilização data de há mais de 8000 anos. Foi inicialmente usada como revestimento de superfícies, antes mesmo de ser usada como agente de fixação entre pedras (Martins *et al.*, 2004).

A cal é um dos materiais mais antigos utilizados na construção, sendo antecededida apenas por materiais como a pedra, o barro, a terra e a madeira. Podem ser referidos restos da utilização de argamassas de cal empregues na Palestina (7.000 a.C.), aplicações de cal apagada na Turquia (6.000 a.C.) e estuque nas pirâmides do Egito (4000 a 2000 a.C.) (Margalha, 2011).

Julga-se que os gregos foram os primeiros a utilizar a cal como argamassa de revestimento, mas foram os romanos que aplicaram de forma mais eficaz estas argamassas. São de referir os enormes anfiteatros, basílicas e aquedutos, para as quais foram adotadas soluções técnicas como o arco de volta perfeita, a cúpula e a abóbada (Margalha, 2011).

Ao Império Romano seguiu-se um período conturbado da história da Europa, acabando por se perder as tecnologias desenvolvidas pela civilização romana e hoje pouco se sabe sobre as suas argamassas. No entanto estas demonstraram tão bom comportamento que um novo material, surgido no séc. XVIII, foi designado “cimento romano” (Margalha, 2011).

Este ligante hidráulico, originário da calcinação de pedras de marga, foi usado principalmente para trabalhos em que eram exigidos tempos de presa rápidos e impermeabilidade à água. A sua descoberta disseminou-se por toda a Europa e as suas propriedades fizeram deste cimento uma grande ajuda na construção de edifícios até ao desenvolvimento de cimentos artificiais (Gosselin *et al.*, 2008).

2.2. Desenvolvimento da indústria do cimento romano

Até ao final do século XIX os sistemas construtivos mais comuns eram as estruturas em madeira e em alvenaria. Desde as primeiras utilizações da alvenaria de pedra que se tenta otimizar um material que une as pedras de forma coesa, sendo inicialmente utilizadas

argamassas de barro e posteriormente argamassas de cal e cimento. É assim que se inicia a história da cal e do cimento como ligantes para argamassas (Carvalho, 2008).

A presente dissertação baseia-se no estudo do cimento romano, um cimento que pode ser colocado entre a cal hidráulica e o cimento Portland. Este tipo de cimento é um ligante hidráulico, altamente natural, produzido a partir da calcinação de margas e posterior moagem do produto resultante. As margas são uma combinação natural de calcário e argila, que necessitam de calcinação abaixo da temperatura de sinterização e moagem, produzindo-se assim um ligante de notável resistência e durabilidade (Pintér *et al.*, 2013).

Os romanos já usavam a cal como ligante, mas foi a descoberta do Opus Caementicium que alavancou a engenharia romana. O principal componente deste material era uma cinza pozzolânica que misturada à argamassa de cal produzia um material de características semelhantes às do cimento atual (Carvalho, 2008). Vitruvius (tradução Maciel, 2006) descreveu a existência de um tipo de pó que misturado à cal, não somente confere firmeza como também solidifica em baixo de água. Vitruvius refere também que quando três fatores formados perante o fogo se agregam numa única mistura, absorvendo um deles o elemento líquido, estes aglutinam-se subitamente, enrijecem e solidificam rapidamente, não podendo flutuar nem ser dissolvidos pela água.

Essa argamassa com caementum foi usada em construções do Fórum Romano, como o Coliseu, os Banhos Romanos, a Basílica de Constantino e o Panteão, obtendo-se com este material a impermeabilidade, estanquidade e resistência que os romanos procuravam. No entanto, na Idade Média este conhecimento foi esquecido, reaparecendo no século XVIII.

Em 1756 John Smeaton, anunciou que a existência de argila no calcário era o mais certo índice da qualidade do produto obtido pela sua calcinação para obras hidráulicas (Varela *et al.*, 2005). Mais tarde, em 1758, concluiu que o cimento obtido de uma mistura de calcário e argilas era muito superior ao calcário puro (Carvalho, 2008).

Em 1791 James Parker descobriu um cimento produzido através de septaria. Este produto era obtido pela cozedura a temperatura moderada de cais argilosas muito ricas em sílica e alumina (pedras calcárias muito argilosas). Uma patente britânica foi assim concedida a Parker em 28 de Julho de 1796 devido à sua invenção: “Um certo cimento ou terras para usar em edificios e trabalhos de estuque”. Na sua patente Parker descreveu o processo de fabrico deste cimento, referindo que as pedras de argila deveriam ser partidas em pequenos fragmentos, queimados

em um forno com um calor quase suficiente para vitrifica-los e reduzidos a pó através de uma operação mecânica. Parker refere também que para compor o cimento da melhor maneira deveriam ser usadas duas medidas de água e cinco medidas do pó descrito, devendo este ser adicionado na água, ou a água no pó (Carvalho, 2008).

Este estudo marcou o início da história de sucesso de um grupo de ligantes conhecidos como cimentos romanos.

Expirada a patente de James Parker, químicos e engenheiros chegaram à conclusão de que com a mistura de calcário com aproximadamente um terço de argila e uma pequena quantidade de óxido de ferro, se conseguia um cimento semelhante ao cimento patenteado.

Em 1817 Louis Vicat, engenheiro francês, publicou o trabalho “Recherches Expérimentales Sur Les Chaux de Construction, Les Bétons et Les Mortiers Ordinaires” no qual elaborou a teoria da hidraulicidade, indicando de forma detalhada as proporções de calcário e de sílica necessárias para obter artificialmente a mistura que, após uma cozedura à temperatura conveniente e após a sua trituração, seria um verdadeiro aglutinante hidráulico (Carvalho, 2008).

Em 1818 a Academia das Ciências de Paris aprovou a descoberta de Vicat, autorizando a sua utilização na construção da ponte de Souillac. Este cimento tornou-se assim muito popular. A grande capacidade de resistência adquirida em poucos dias terá sido um dos principais fatores da sua rápida divulgação e utilização (Margalha, 2011).

No entanto, em 1824 Joseph Aspdin solicitou e obteve a patente para um aperfeiçoamento no método de produção existente. O processo consistia em fabricar um ligante hidráulico através de uma mistura de calcário e argila, diferindo do processo de Vicat pela temperatura de calcinação mais elevada (na ordem dos 1.400 – 1.500°C), permitindo obter elevadas resistências mecânicas. Surgiu assim um cimento ao qual Aspdin deu o nome de Cimento Portland, devido à sua semelhança com o calcário branco-prateado que se extraía de algumas pedreiras existentes na península de Portland (Varela *et al.*, 2005).

O sucesso do cimento Portland deveu-se em parte a um acidente ocorrido em 1825. O engenheiro francês Marc Brunel iniciou a construção de um túnel sob o rio Tamisa (Figura 1), o primeiro a usar paredes com revestimento de proteção. Durante a construção deste túnel houve um acidente em que morreram alguns trabalhadores com o desabar de parte do teto. Esta

obra só pôde ser concluída em 1843, após a drenagem do túnel e a substituição do cimento romano pelo cimento Portland, refazendo a parte destruída (Carvalho, 2008).

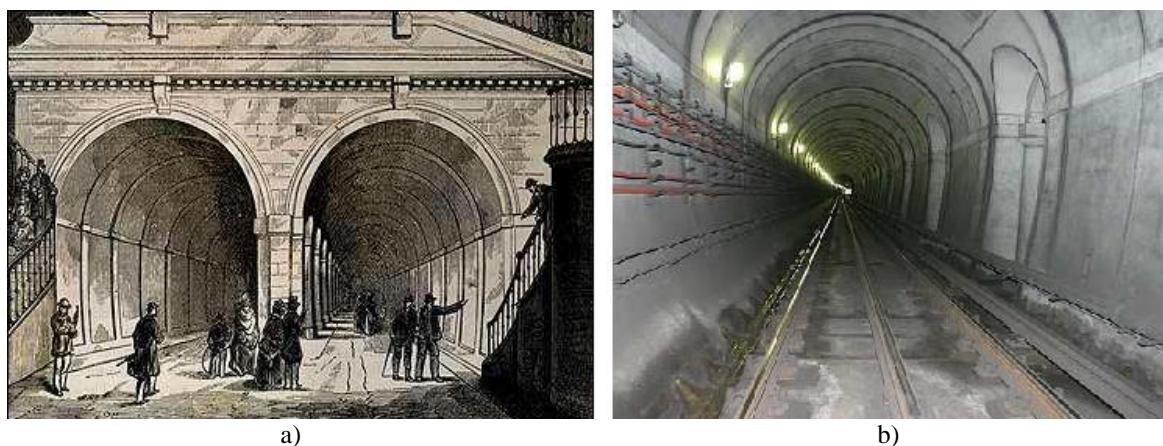


Figura 1. Túnel construído sob o rio Tamisa: a) imagem da época b) imagem atual
(Fonte: Carvalho, 2008)

2.3. Uso e aplicação de cimentos romanos

A produção de cimento romano não mudou muito desde que James Parker o produziu pela primeira vez. Cimentos romanos continuaram a ser cimentos naturais, provenientes de uma única rocha de origem, apesar de algumas tentativas em usar misturas de materiais. O cimento romano manteve assim as suas principais propriedades e características, até o seu uso e produção entrarem em declínio em meados do século XX.

O século XIX foi uma época de rápida expansão na indústria, na sociedade e na construção, dando-se o auge deste material que era usado e aplicado de diferentes formas e para diferentes fins. As cidades expandiram-se em grande escala, sendo construídos monumentais edifícios públicos e residenciais. Acompanhando todo este desenvolvimento, o cimento romano era a chave de grandes projetos de engenharia.

2.3.1. Formulação de argamassas

Considerando diferentes materiais, períodos históricos e zonas geográficas, as argamassas utilizadas apresentavam variadas razões ligante/agregado: para moldes a percentagem de agregados era baixa (20-25%), sendo mais elevada no caso da sua utilização para rebocos (40-50%). É de referir que eram vários os materiais utilizados como agregado, refletindo-se assim

as condições geológicas locais. A forma dos grãos dos agregados variava de muito redondo para muito angular, sendo prática comum usar areias disponíveis localmente (Gurtner *et al.*, 2012).

2.3.2. Rebocos

Os rebocos realizados em cimento romano apresentam espessuras de 2 a 50mm, podendo tratar-se de um único revestimento aplicado diretamente sobre o suporte ou um revestimento tipo sandwich, onde após a aplicação da camada de reboco era aplicada uma segunda camada mais fina que proporcionava uma superfície lisa definitiva. Os primeiros estuques de cimento romano eram coloridos através de lavagens de cal e através da aplicação de tintas a óleo. No período pós 1850, os estuques de cimento romano passaram a ser terminados com composto de cimento diluído em água (Gurtner *et al.*, 2012).

2.3.3. Moldagem de elementos arquitetônicos e decorativos

O cimento romano foi bastante utilizado para a produção de elementos decorativos (Figura 2), sendo estas peças fundidas produzidas em moldes. O rápido tempo de presa das argamassas permitia uma rápida remoção dos moldes e a utilização repetida dos mesmos.

Estes cimentos apresentavam cores rosa-acastanhado a castanho-escuro, sendo deixados sem pintura. Só posteriormente a 1900, estes elementos começaram a ser pintados, numa tentativa de os integrar no restante conceito da fachada (Gurtner *et al.*, 2012).



Figura 2. Exemplo de elementos decorativos em janelas da Antiga Academia do Comércio, em Cracóvia, Polónia (Fonte: Gurtner *et al.*, 2012)

2.3.4. Trabalhos de pormenorização

Sendo as fachadas dos edifícios decoradas com formas arquitetónicas que imitavam os grandes estilos de épocas passadas, os trabalhos de pormenorização eram bastante importantes. Este é o caso da moldagem de variados elementos dos edifícios, tais como cornijas. Estes elementos eram obtidos através da aplicação de argamassa *in-situ* e da repetida passagem de um perfil sobre ela (Figura 3) (Gurtner *et al.*, 2012).



Figura 3. Moldagem de cornija (Fonte: Gurtner *et al.*, 2012)

2.4. Construções em cimento romano

Por todo a Europa foram construídos edifícios com recurso a cimento romano. No entanto, muitas vezes argamassas de cimento romano são confundidas com argamassas de cal, não sendo conhecida a maioria das construções em que este material foi empregue.

Alguns exemplos de edifícios construídos com recurso a argamassas de cimento romano são a Universidade Nacional Politécnica de Lviv na Ucrânia, edifícios de habitação em Brno na República Checa, o Edifício Municipal em Zabrze na Polónia, a Estação Ferroviária de Blaubeuren na Alemanha e a Basílica Valére em Sion na Suíça.

Koller (2012) refere que variados edifícios em Viena foram construídos com recurso a argamassas de cimento romano. Kozłowski (2012) menciona Cracóvia como sendo a cidade do cimento romano devido ao variado número de construções, onde podem ser encontrados revestimentos e elementos decorativos de cimento romano. Exemplos dessas construções encontram-se na Figura 4.



a) b) c)
 Figura 4. Exemplos de construções em cimento romano: a) Escola municipal, Cracóvia, Polónia b) Colégio da Agricultura, Cracóvia, Polónia c) Casa “Sob a Aranha”, Cracóvia, Polónia
 (Fonte: Kozłowski, 2012)

Em Portugal, a informação sobre construções onde o cimento romano foi utilizado é praticamente nula. No âmbito do restauro do Teatro Nacional São João no Porto (Figura 5), um estudo recente revelou a existência de cimento romano neste edifício. No entanto, este é a única construção onde é garantida a utilização deste material. O Teatro Nacional São João foi projetado pelo arquiteto José Marques da Silva, motivo pelo qual se pode supor que outras construções deste mesmo arquiteto possam também apresentar cimento romano. No Porto este arquiteto foi responsável por projetos como a Estação de S. Bento, o Edifício das Quatro Estações, os Liceus Alexandre Herculano, a Casa da Irmandade da Lapa, o edifício geminado à Igreja, o Liceu Rodrigues de Freitas, os Armazéns Nascimento e a Casa de Serralves. O trabalho deste arquiteto estendeu-se também a outras regiões do país, tendo projetado por exemplo o Santuário da Penha em Guimarães e o Edifício das Obras Públicas em Braga.



Figura 5. Teatro Nacional São João, Porto (Fonte: Leite, 2013)

Os exemplos em cima referidos não confirmam a utilização de cimento romano, sendo apenas exemplos onde o cimento romano pode ter sido utilizado como revestimento ou como elemento decorativo moldado. Supõe-se assim que este material tenha sido utilizado em edifícios das áreas centrais da maioria das cidades e nos novos bairros que naquela altura se ergueram em torno dos velhos centros históricos, essencialmente em edifícios públicos e outros de grande importância para a época, tais como edifícios de cinemas, cafés e garagens.

Capítulo 3

Produção de Cimento Romano

3. PRODUÇÃO DE CIMENTO ROMANO

3.1. Processo de produção

As pedras de cimento utilizadas como matéria-prima para a produção de cimento romano são chamadas de margas, sendo estas provenientes de diferentes formações geológicas de regiões europeias. Um tipo específico de margas são as *septarias* (Hughes *et al.*, 2007). A natureza geológica das margas determina a qualidade do cimento romano, variando este nas cores e propriedades (Hughes *et al.*, 2007).

Um fator importante a considerar era a localização da fábrica de cimento. Assim, a proximidade com a fonte de matéria-prima devia ser considerada, tal como o fornecimento de combustível e as infraestruturas necessárias para fornecer o cimento por via ferroviária, fluvial ou transporte rodoviário.

O tamanho e a forma dos fragmentos de marga a ser calcinada variam significativamente, podendo a forma variar de volumoso a lamelar. Este é um fator de grande importância relativamente à transferência de calor no interior do forno. O processo de mistura das pedras de cimento provenientes de diferentes áreas era uma prática comum, sendo várias vezes utilizada com o objetivo de obter um cimento romano com melhores propriedades (Gurtner *et al.*, 2012). Os fornos de cimento romano eram geralmente do tipo de eixo vertical (Figura 6), funcionando de forma periódica ou contínua e sendo utilizada madeira, carvão, coque ou até mesmo relva como combustível.

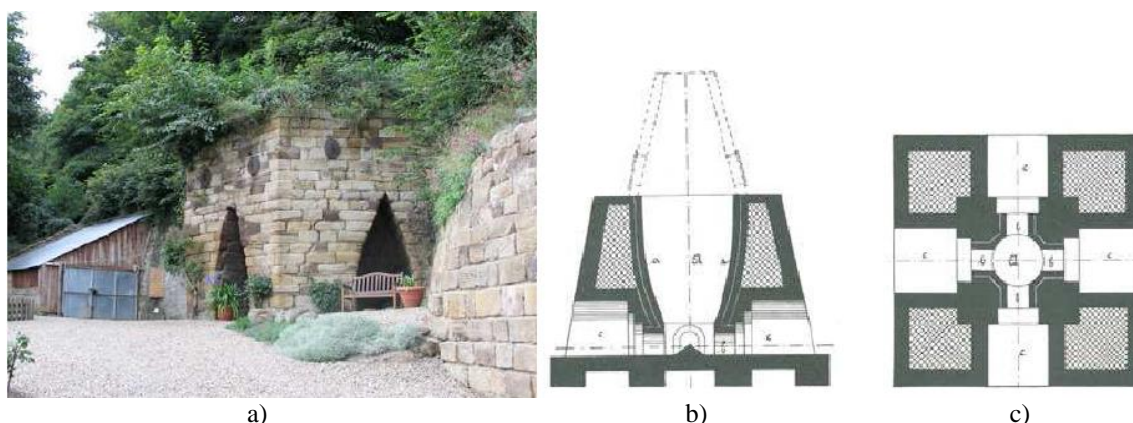


Figura 6. Exemplo de forno de eixo vertical utilizado para calcinação de cimento romano:

- a) Forno localizado em Sandsend, em Inglaterra (Fonte: Kozłowski *et al.*, 2010)
 b) Seção de um forno tradicional c) Planta de um forno tradicional (Fonte: Gurtner *et al.*, 2012)

As temperaturas de calcinação eram tipicamente abaixo da temperatura de sinterização. Hoje sabe-se que para a maioria do cru esta foi inferior a 1.000°C, embora grandes variações de temperatura de calcinação tenham sido inevitáveis. O tempo de calcinação depende do tamanho do cru e do forno, sendo normalmente aproximadamente 36 horas.

Seguidamente dá-se a moagem do clínquer, um passo decisivo para se obter a finura correta. O material calcinado é reduzido "a um pó impalpável, até não ser perceptível nenhuma areosidade ao esfregar uma pitada entre o polegar e o dedo indicador". Era comum usar moinhos com pedras verticais, onde eram usados rolos de ferro fundido para obter um pó fino (Gurtner *et al.*, 2012).

A embalagem e o armazenamento do cimento no solo era um mecanismo essencial de controlo de qualidade para minimizar a reação entre o cimento e a humidade contendo dióxido de carbono do ar. Este mecanismo originaria um prolongamento nos tempos de presa e de endurecimento das argamassas.

Os cimentos eram geralmente embalados em sacos de 25kg ou em barris de 250kg, sendo o interior dos mesmos forrado com papel alcatroado.

3.2. Locais de produção de cimento romano

Na Europa, durante a primeira metade do século XIX os cimentos romanos foram predominantemente produzidos e utilizados em Inglaterra. Parker começou o fabrico do cimento romano em Kent. De 1798 em diante, a empresa Parker & Wyatt, começou a extrair a sua matéria-prima *septaria* do Estuário do Tamisa, tornando-se os primeiros produtores de cimento romano a partir dessa data. Grande parte da indústria ficou na costa de Essex e perto de Londres (Gurtner *et al.*, 2012).

A exportação para a restante Europa e para os Estados Unidos da América era ainda limitada. No entanto, quase todos os países europeus rapidamente se interessaram por este produto e o começaram a produzir (Gurtner *et al.*, 2012).

A França foi o país europeu onde os cimentos romanos foram primeiramente produzidos, tendo sido fabricados em Boulogne-sur-mer, logo após a descoberta do depósito em 1802. A produção industrial começou na Borgonha e posteriormente em Vassy, tendo sido produzidos

cimentos romanos utilizados no reparo da pedra de muitas das famosas catedrais góticas francesas. De 1840 em diante várias fábricas de cimento natural se iniciaram em França. O cimento romano, geralmente referido como "Ciments Prompt Naturels", ainda hoje é fornecido pelo Grupo Vicat em Grenoble (Gurtner *et al.*, 2012).

Nas primeiras décadas do século XIX a Alemanha importou os seus cimentos romanos de Inglaterra. O primeiro cimento romano fabricado na Alemanha data do final da década de 1820, tendo a produção começado entre Würzburg e Bamberg e, simultaneamente, ao redor de Munique. No início dos anos 1840, a área de Ulm tornou-se um centro de produção industrial com 16 empresas fornecedoras de cimento romano para a parte sul da Alemanha, para a Áustria e para a Suíça (Gurtner *et al.*, 2012).

A Áustria foi um dos países onde os cimentos romanos foram amplamente produzidos. Após algumas importações menos significativas a produção austríaca de cimento romano começou na área de Kufstein do Tirol, em 1842. A partir daí, Perlmooser Zementwerke AG, tornou-se o maior produtor de cimento romano no país (Gurtner *et al.*, 2012).

Sabe-se que no Império Austro-Húngaro de 1887, a quantidade de cimento romano produzido foi cinco vezes maior do que a de qualquer outro ligante (Gurtner *et al.*, 2012).

O uso de cimentos romanos começou a diminuir muito mais cedo no Reino Unido do que nos restantes países, devendo-se este declínio a uma redução na disponibilidade de *septaria* e a desenvolvimentos na produção de cimento Portland. Posteriormente deu-se uma queda destes cimentos na restante Europa, quando muitas fábricas optaram por produzir unicamente cimentos Portland que respondiam melhor às necessidades da altura.

Atualmente poucas são as empresas que produzem cimento romano, sendo de referir que a maioria delas o produz em pequenas quantidades, apenas a nível regional ou apenas a pedido. Alguns dos conhecido produtores são os seguintes:

- **Groupe Vicat, Grenoble, França** ("Ciment Naturel Prompt Vicat" é amplamente distribuído na Europa e comercializado sob diferentes nomes de marca, como por exemplo, "Fix Cimento Prompt" na Alemanha);
- **Cementos Collet, Barcelona, Espanha** ("Cemento Natural Marfil" é um cimento natural produzido perto de Barcelona, pela Cementos Collet);

- **Cimento Natural Tigre, Barcelona, Espanha** (Cimento Natural Tigre produz para o mercado espanhol o “Cimento Natural Rápido Tigre”).

3.3. Produção de cimento romano em Portugal

Em Portugal, o interesse pela questão do cimento desperta na última década do século XIX. No entanto, já antes esta indústria havia passado por uma sucessão de experiências em torno do cimento romano que, regra geral, resultaram num produto de baixa qualidade, incapaz de concorrer com os cimentos estrangeiros (Pombo, 2008).

A indústria do cimento iniciou-se no nosso país em 1866, com uma fábrica de cimento romano em Lisboa. Fracassada esta tentativa, seguiu-se-lhe outra no Cabo Mondego, que em 1884 começou o fabrico de cal hidráulica e cimento natural (Neves, 1894).

Em Pataias e S. Pedro de Moel exploraram-se calcários argilosos e nos arredores, em Maceira, arrancaram-se calcários margosos para fabrico de produtos hidráulicos naturais (Neves, 1894). Conhecem-se também as formações calcárias da serra da Arrábida e as formações argilo-calcárias que se estendem até Setúbal, apresentando estas matérias-primas essenciais e de fácil acesso por terra e por mar (Secil, 2014).

É de referir que o engenheiro civil Rocha e Mello estudou o processo de fabrico de cimento em Portugal, dando em 1918 uma exaustiva lista de razões para a construção de uma Fábrica de Cimento em Portugal, evidenciando que no solo português se encontravam as melhores matérias-primas para o fabrico do cimento (calcários e margas argilosas) (Bolas, 2011).

3.3.1. Fábrica de Maceira

Segundo Gil Braz de Oliveira (1999), a freguesia de Maceira foi fortemente marcada pela presença dos romanos e de atividades manufatureiras e industriais propiciadas por recursos minerais valiosos, um dos quais o calcário.

Em 1875, eram exploradas umas instalações bastante artesanais no lugar da Gândara, incluindo estas dois fornos e um moinho de vento, usado para moer a cal (Oliveira, 1999). Em 1890,

estas instalações foram compradas, fundando-se a Fábrica de Cimentos de Maceira e posteriormente montada uma nova fábrica na zona (Oliveira, 1999).

Em 1900, a fábrica terá sido ampliada com um conjunto de fornos sistema DIETSCH modificado, além dos tradicionais fornos, chegando a produzir 3000 toneladas por ano de cal hidráulica, cimento natural de presa lenta (marca Santa Iria) e ainda cal hidráulica de maior resistência, designada cal-cimento (Oliveira, 1999). É de referir que o cimento natural produzido nesta fábrica era proveniente de calcários do Couto Mineiro do Cabo Mondego, tendo sido o cimento natural do Cabo Mondego possivelmente o cimento natural de melhor qualidade obtido no nosso país (Oliveira, 1999).

3.3.2. Fábrica da Rasca

Gil Braz de Oliveira (1999) refere que durante séculos o fabrico de cal esteve presente nas margens do Vale de Alcântara, devendo-se isso ao facto de este ser um material com grande aplicação no desenvolvimento urbano da cidade e à existência de boas pedreiras de calcário nas encostas do vale e nos contrafortes da Serra de Monsanto.

Em 1866, uma das fábricas em laboração situava-se na Rua do Alvito, não usando apenas os calcários extraídos das pedreiras do Vale de Alcântara, mas também calcários margosos extraídos da Serra da Pedra Branca, na Quinta da Rasca, junto à foz do rio Sado. A utilização destes calcários marca as tentativas de descobrir o novo ligante hidráulico, o cimento Portland. Na realidade, empresas que até aquela altura produziam unicamente cal começaram a produzir cimentos naturais, conhecidos como romanos (Oliveira, 1999).

Em 1866, conhecendo-se as propriedades dos calcários argilosos da Serra da Pedra Branca, decidiu-se cozer essa matéria-prima nos fornos de Alcântara. Esta terá sido a primeira tentativa de fabricar cimento romano em Portugal (Oliveira, 1999).

Ao primeiro cimento natural produzido foi dada a designação RASCA, tendo a sua produção atingido as 28 barricas de 150kg por dia. No entanto, este cimento era bastante irregular e de fraca qualidade, essencialmente devido à inexistência de controlo da qualidade da matéria-prima e à sua má mistura, cozedura incompleta, deficiente moagem e deficiente peneiração do material obtido (Oliveira, 1999).

A aplicação deste cimento chegou a ser prevista em obras do cais oriental de Lisboa. No entanto foram realizados ensaios que revelaram que passado pouco tempo o chapado de cimento se esfoliava e esfarelava ao ar. Por outro lado, em 1873, o engenheiro D. António de Almeida defende a aplicação deste cimento em obras de docas e pontes-cais devido ao facto de já o ter aplicado durante cinco anos em obras nos portos de Lisboa e de Setúbal. No entanto, os ensaios realizados com o cimento natural RASCA indicaram a sua rejeição para as obras do cais oriental de Lisboa. Esta rejeição, juntamente com a concorrência de cimentos similares estrangeiros, levaram em 1877 à falência desta primeira empresa (Oliveira, 1999).

Posteriormente, essa fábrica foi adquirida e reinstalada no Altinho, com quatro fornos intermitentes, aparelhos de moagem e peneiração e uma máquina a vapor de doze cavalos. Esta fábrica difere da anterior nos calcários que utilizava, uma vez que tentando reduzir os custos, optou-se por não utilizar os calcários da Quinta da Rasca, recorrendo apenas aos calcários margosos da pedreira do Alvito. No entanto, estes não eram apropriados ao fabrico de cimento romano.

Em 1895, é cedido o direito à exploração de uma mina de cimento romano existente em um terreno em Vale de Móz, sendo possível continuar o fabrico do cimento natural. Para tal, utilizaram-se as instalações existentes na Quinta da Rasca, passando estas a designar-se por Fábrica da Falésia de Cimento da Rasca (Oliveira, 1999).

No entanto, sendo o cimento natural um material de transição entre a cal hidráulica e o cimento Portland, poucos anos após o início do seu fabrico, a Fábrica da Falésia de Cimento da Rasca viu-se obrigada a suspender o fabrico desse cimento (Oliveira, 1999).

Em 1906, a Fábrica da Rasca (hoje Fábrica de Outão) iniciou a produção de cimento Portland, marca TENAZ, utilizando uma tecnologia semelhante à utilizada na Fábrica de Alhandra.

3.4. Normalização do cimento romano

Numa tentativa de controlar a qualidade dos cimentos romanos era necessária a criação de especificações padrão. Assim, de 1880 em diante foram sendo criadas normas padrão, particularmente na Áustria. Os EUA, a França e a Espanha possuem também normas padrão para o cimento romano.

As normas são no entanto bastante limitadoras, uma vez que garantem que o seu próprio cimento as cumpre, mas não procuram uma abordagem universal que consiga abranger a variada gama da família dos cimentos romanos. Se considerarmos o cimento romano existente nos EUA, que requer um tempo mínimo de presa de 30 minutos, verificamos que a norma padrão dos EUA iria rejeitar os cimentos europeus.

O caso da norma Austríaca é de salientar. Em 1880 a Associação Austríaca de Engenheiros e Arquitetos criou uma norma que refere as recomendações técnicas necessárias para criar cimentos romanos de alta qualidade. Esta norma foi modificada em 1890 e fornece uma definição contemporânea dos cimentos romanos: produtos obtidos a partir de margas argilosas, queimadas abaixo da temperatura de sinterização (Rocare, 2014).

Esta norma não especifica nenhuma composição mas pela primeira vez são caracterizadas três classes de cimento romano que permitem facilmente escolher o cimento de acordo com a sua finalidade. Para esta classificação a norma Austríaca baseia-se no tempo de presa dos cimentos, sendo eles os seguintes:

- Cimento rápido: aquele que sem adição de areia, e após adição de água, apresenta um tempo de presa inferior a 7 minutos;
- Cimento normal: aquele que sem adição de areia, e após adição de água, apresenta um tempo de presa entre 7 a 15 minutos;
- Cimento lento: aquele que sem adição de areia, e após adição de água, apresenta um tempo de presa superior a 15 minutos.

A norma Austríaca especifica outras características que incluem a finura de moagem do cimento, a densidade na água e no ar e as resistências à compressão e à tração, de acordo com os vários cimentos e idades (Rocare, 2014).

Capítulo 4

Comportamento e Características do Cimento Romano

4. COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO ROMANO

4.1. Composição química

A mineralogia dos cimentos romanos resulta de várias reações que ocorrem durante o processo de queima, dependendo das características da matéria-prima e das temperaturas de calcinação (Wilk *et al.*, 2013).

O cimento romano é fabricado através da calcinação a baixa temperatura de uma única matéria-prima, produzindo simultaneamente aluminato de cálcio e silicato de cálcio.

As margas são principalmente compostas por calcite, minerais de argila (mica, ilite, esmectite, clorite e caulinite) e quartzo. Por vezes a dolomite substitui a calcite e a marga pode também conter componentes menores, tais como feldspato e pirite.

A mineralogia e a textura dos minerais dá ao cimento romano diferentes propriedades. Por exemplo, a sílica existente nos minerais de argila é provável que se combine quimicamente de forma mais eficaz com a cal do que a sílica existente nas partículas de quartzo.

A composição química dentro da qual se forma um clínquer de cimento romano a temperaturas entre cerca de 850 e 1100°C é definida pelos elementos Ca, Si, Fe e Al. A mistura destes elementos na marga é um requisito importante para se darem as reações de clínquer necessárias para um bom cimento romano, sendo que a proporção de óxidos, ou seja, a composição química de cru pode variar bastante dentro de determinado intervalo.

O cimento romano apresenta duas fases reativas de silicatos, sendo elas belites (C_2S) β e α . Estas fases são formadas de cal e silicatos existentes dentro da argila da marga e de cal que migra internamente para os cristais de quartzo, formando-se e encontrando-se estáveis a temperaturas entre 900°C e 1200°C (Varas *et al.*, 2004).

Existe no cimento romano outra fase reativa que compreende aluminatos de cálcio. Esta fase amorfa apresenta uma matriz muito fina de granulados dentro da qual existe belite cristalina (Gurtner *et al.*, 2012).

Em pequenas quantidades existe também um alumínio silicato reativo, a guelenite (C_2AS), que se forma a temperaturas inferiores a $1200^{\circ}C$ (Varas *et al.*, 2004).

À medida que a temperatura de calcinação aumenta, a quantidade de belite β aumenta à custa de belite α , a quantidade de material amorfo diminui e aumenta a quantidade de guelenite.

Verifica-se assim que o grau de calcinação e a composição mineralógica das margas são dois parâmetros de extrema importância para as propriedades do cimento romano.

De acordo com o projeto ROCARE, a Figura 7 mostra os resultados da calcinação em laboratório de uma marga austríaca. A seta indica a temperatura ótima de calcinação e é evidente que a esta temperatura existem restos de marga não queimada dentro do clínquer, ou seja, calcite e quartzo.

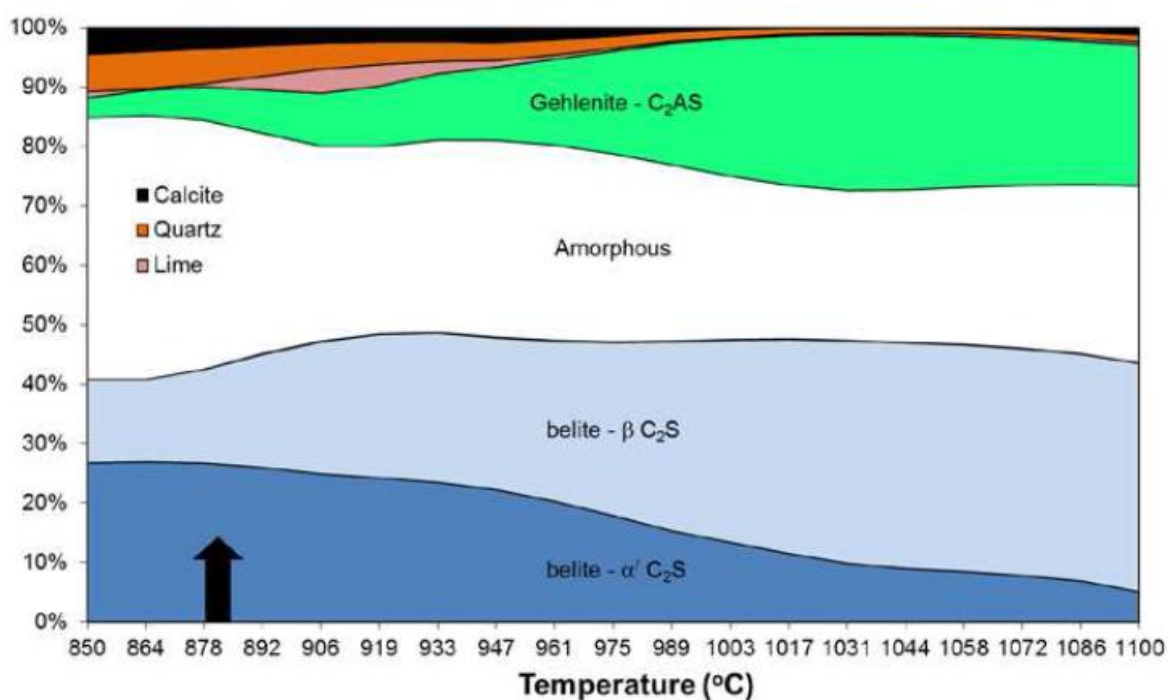


Figura 7. Alteração da composição de um cimento romano com a temperatura
(Fonte: Gurtner *et al.*, 2012)

De acordo com a sua composição química, os cimentos romanos podem ser classificados em dois tipos: rápidos e lentos. Os cimentos romanos rápidos são fabricados utilizando margas com baixo teor em argila (25-30%), ricas em calcário (C_3S , C_4S e C_2S), queimadas a temperaturas entre $1000^{\circ}C$ e $1200^{\circ}C$, durante 12 a 20 horas, apresentando uma presa rápida (inferior a 30min) e um aspeto mais carbonatado e poroso. Os cimentos romanos lentos são fabricados utilizando margas com alto teor em argila ($\sim 40\%$), ricas em sílica (CS e C_3S_2),

queimadas a temperaturas entre 800°C e 1000°C, durante 8 a 12 horas, apresentando uma presa mais lenta (30 minutos a 12 horas) e um aspeto menos carbonatado e poroso (Aspiazu, 1924).

4.2. Hidratação

Quando misturado com água para produzir uma pasta ou argamassa, o cimento romano segue um caminho especial no desenvolvimento da sua resistência, que corresponde a eventos de hidratação dos elementos reativos do seu clínquer.

Após uma rápida presa, o aumento da resistência é lento. No entanto, após vários meses a resistência à compressão apresenta valores iguais ou superiores aos do cimento Portland. Assim, a forma geral das curvas que descrevem o aumento da sua resistência é considerada uma característica específica dos cimentos romanos (Rocare, 2014).

Na primeira etapa da hidratação, os aluminatos de cálcio amorfos hidratam-se rapidamente formando uma variedade de hidratos de aluminato de cálcio, conhecidos por AFm, responsáveis pela rápida presa da argamassa e pela sua força em idade precoce. Caso a marga possua um elevado teor de sulfato, a fase AFm é aumentada pela deposição de etringite.

A taxa de hidratação rapidamente diminui, demorando 2 a 8 minutos. Posteriormente ocorre um período de "dormência", havendo pouca atividade de hidratação e podendo durar de 1 dia a 1 mês. No caso de excesso de clínquer queimado, o período de dormência é estendido e o cimento pode não hidratar mais. A segunda etapa de hidratação é controlada pelas fases belite, sendo a belite α a mais reativa. O produto de hidratação desta etapa é o hidrato de silicato de cálcio (CSH), sendo a sua produção relativamente lenta, longa e responsável pelo ganho de força ao longo de meses e anos.

4.3. Cimento Romano Versus Cimento Portland

O processo de fabrico de cimento romano difere em dois aspetos do processo de fabrico de cimento Portland. Em primeiro lugar é importante referir o uso de uma pedra natural como cru para o cimento romano, e em segundo lugar a baixa temperatura de calcinação em oposição ao cimento Portland. Assim, a composição mineralógica é bastante diferente em ambos os cimentos, originando comportamentos também diferentes (Varas *et al.*, 2004).

Ao contrário dos cimentos Portland, os cimentos romanos apresentam rápidos tempos de presa após a adição de água. A presa do cimento Portland é controlada pela adição de uma pequena quantidade de sulfato de cálcio enquanto nos cimentos romanos não é adicionado sulfato de cálcio que implica uma presa muito rápida (Gosselin *et al.*, 2008).

Cimentos Portland diferem dos cimentos romanos no teor de Al_2O_3 , ligeiramente inferior no primeiro caso (5 a 10%) e na quantidade controlada de CaO superior no cimento Portland (65 a 70%) (Gosselin *et al.*, 2008).

Em contraste com o cimento Portland, argamassas de cimento romano apresentam uma elevada porosidade, o que garante bom transporte de água e vapor de água (Gosselin *et al.*, 2008).

Em casos de restauro, o cimento Portland não é compatível com o cimento romano, tanto por causa do seu desempenho estético e técnico como pela sua composição química. Argamassas de cimento Portland são compactas, "não porosas", impermeáveis ao vapor de água, rígidas e na maioria das vezes fortes em comparação com o suporte que cobrem.

4.4. Propriedades das argamassas de cimento romano

4.4.1. Argamassas para elementos moldados

Segundo o projeto ROCARE, para elementos moldados, as argamassas de cimento romano apresentam formulações que variam de 1:0,5 a 1:1 de cimento:areia, em volume. Quanto à razão água/cimento, esta depende das características do cimento utilizado, variando entre 0,45 e 0,55 (Gurtner *et al.*, 2012).

Na utilização destas argamassas para elementos moldados, um tempo de trabalhabilidade de 15-30 minutos é o ideal, podendo ser utilizados retardadores químicos (Gurtner *et al.*, 2012).

4.4.2. Argamassas para reboco

Segundo o projeto ROCARE, para rebocos, as argamassas de cimento romano apresentam formulações que variam de 1:0,5 a 1:3 de cimento:areia, em volume. Relativamente à razão

água/cimento, esta depende do cimento utilizado, variando entre 0,4 e 0,8 (Gurtner *et al.*, 2012).

Utilizando este tipo de argamassas para reboco, um tempo de trabalhabilidade de 1-2 horas é ideal para grandes áreas a rebocar. No entanto, este tempo não pode ser alcançado com retardadores sem haver redução substancial de resistência (Gurtner *et al.*, 2012).

4.4.3. Argamassas bastardas para reboco

Argamassas bastardas para rebocos podem ser usadas, substituindo parte do teor em cimento por cal. Usando a cal de forma adequada, as características das argamassas de cimento romano podem ser refinadas, conseguindo-se propriedades específicas, não retardando a presa do cimento romano e possibilitando a utilização de retardadores de presa (Gurtner *et al.*, 2012).

4.4.4. Porosidade

A porosidade é uma característica essencial das argamassas de cimento romano, sendo que a elevada transmissão de vapor de água é orientada pela sua estrutura de poros. Em idades precoces a estrutura de poros revela-se muito grosseira, reduzindo-se em idades posteriores. Uma estrutura de poros mais grossa é resultado da produção de AFm. Por sua vez, a reação da belite leva ao preenchimento desta rede com CSH, produzindo uma estrutura mais refinada. As argamassas de cimento romano apresentam uma complexa estrutura de poros, podendo ser consideradas três categorias de poros. Os poros mais finos encontram-se dentro da matriz endurecida. Os poros maiores devem-se a hidratação restrita e posterior evaporação do excesso de água. Os poros com dimensões maiores do que 2mm relacionam-se com processos de secagem e retração da argamassa (Klisinska-Kopacz *et al.*, 2010).

4.4.5. Retração

A retração por secagem de argamassas de cimento romano não produz esforços nos materiais. No entanto, a retração durante a secagem de uma camada de argamassa é limitada pelo suporte

sobre o qual a camada é aplicada. A retração por secagem relaciona-se com a humidade relativa existente no ambiente, o cimento utilizado, a quantidade de areia e a relação água/cimento. A retração diminui quando a humidade e a quantidade de areia aumentam e a proporção água/cimento diminui. Argamassas ricas em cimento romano são mais suscetíveis à fissuração do que argamassas mais pobres; como apenas a matriz cimentícia encolhe, o agregado permanece insensível à secagem. No caso de argamassas ricas em cimento romano e de consistência líquida, como por exemplo para a fabricação de elementos moldados e ricos em detalhes, a fissuração é esperada (Wilk *et al.*, 2013).

Capítulo 5

Aplicação do Cimento Romano na Conservação

5. APLICAÇÃO DE CIMENTO ROMANO NA CONSERVAÇÃO

5.1. Conservação e restauro do património construído

A riqueza e a diversidade da decoração das fachadas de edifícios históricos levam-nos a reconhecer a importância de conservar este património. No entanto, a importância do revestimento nem sempre tem sido reconhecida (Margalha, 2011).

Tal como qualquer material de um edifício, os revestimentos são parte integrante do património: contam-nos parte da nossa história e ensinam-nos as tecnologias utilizadas, o aspeto exterior dos edifícios em determinada época, ou qualquer outra informação que não deve ser apagada ou negligenciada. Assim, as intervenções em edifícios antigos devem manter a aparência original, respeitando-se os seus valores históricos. Na realidade nem sempre é possível manter os revestimentos, mas a introdução de novos materiais e técnicas só deve ser efetuada quando se mostrem evidentes vantagens (Margalha, 2011).

Os cimentos romanos foram os principais materiais utilizados para cobrir as fachadas de edifícios do século XIX e início do século XX. Durante este período de tempo deu-se um rápido crescimento urbano que ainda hoje desempenha um papel importante na cultura e estética da maioria das cidades europeias. No entanto, a falta de cimentos romanos juntamente com a falta de conhecimento sobre o seu desempenho técnico, levou à utilização de ligantes inadequados na conservação destes edifícios. Causaram-se assim perdas irreversíveis na substância original e histórica dos edifícios e das próprias cidades.

Atualmente, quando devidamente curadas, as argamassas de restauro de cimento romano podem atingir compatibilidade química, física e estrutural com as argamassas originais. Em geral, a compatibilidade pode ser definida como a capacidade da argamassa de restauro interagir com o suporte original, sem induzir deterioração (Klisinska-Kopacz *et al.*, 2012).

5.1.1. Aplicação em edifícios históricos

O cimento romano tem-se revelado um material pouco apreciado já desde o século XIX. Na realidade, os edifícios residenciais do século XIX e inícios do século XX eram considerados

modestos e de baixo custo, logo vulneráveis a operações de restauro inadequadas e que possivelmente alterariam para sempre o valor histórico dos mesmos.

Devido a no passado terem sido tomadas medidas de conservação e restauro inadequadas, são raras as fachadas de cimento romano que se revelam inalteradas, mantendo a sua cor original e elementos decorativos finos bem preservados. No entanto, os edifícios que se encontram preservados no seu estado original são geralmente encontrados em bom estado, revelando arestas vivas e superfícies inalteradas, tal como se pode verificar na Figura 8.



Figura 8. Edifício datado de 1873, em Viena, Austria. Fachada com uma combinação de tijolo, pedra e argamassa de cimento romano, preservada no seu estado original, envelhecida naturalmente (Fonte: Kozłowski *et al.*, 2010)

Tal como referido anteriormente, há evidências de que o cimento romano era revestido com lavagens de cal, tintas de óleo para imitar a cor da pedra ou acabamentos de pasta de cimento. Atualmente, uma medida de restauro bastante comum é a pintura das fachadas com tintas modernas, sendo os novos esquemas de cores geralmente decididos sem tentar manter a cor original das superfícies (Gurtner *et al.*, 2012).

A aplicação de cimentos modernos tem-se revelado uma medida bastante recorrente. No entanto, estas aplicações têm alterado a pormenorização comum nestes edifícios, desfigurando os traços finos de decoração e acumulando sujidade (Gurtner *et al.*, 2012). A cal é fisicamente mais compatível do que argamassas de cimento Portland, podendo uma maior deterioração ser evitada através da sua aplicação. No entanto, quando cimentos romanos estão presentes, a cal é tão imprecisa como o cimento Portland (Walsh, 2007).

Os aspetos mais básicos que favorecem o uso de cimento romano na conservação de estruturas históricas de cimento romano são a autenticidade e a compatibilidade. Embora a replicação do

material original seja a maneira mais simples de garantir a compatibilidade, o caso do cimento romano é particular, uma vez que este é conhecido por manter uma alta permeabilidade ao vapor de água a longo prazo e um baixo módulo de elasticidade (Rosendale Natural Cement, 2014). Com o passar do tempo o cimento Portland continua a ganhar resistência e densidade, o que consequentemente vai originando uma redução na permeabilidade ao vapor de água. Uma estrutura de cimento romano e uma argamassa de cimento Portland podem parecer compatíveis durante anos, mas à medida que o tempo passa, mais incompatíveis se tornam, podendo originar danos estruturais na estrutura reparada com essa argamassa (Rosendale Natural Cement, 2014).

As argamassas de cimento Portland são muito fortes, possuem coeficientes de absorção de água e de permeabilidade ao vapor de água que são muito baixos, geram forças de ligação entre a argamassa e o suporte muito altas, têm uma porosidade muito baixa e apresentam uma presa muito lenta para a produção de elementos moldados (Gurtner *et al.*, 2012).

Numa tentativa de introduzir os cimentos romanos na conservação de edifícios históricos, têm sido desenvolvidos vários cimentos romanos e técnicas relacionadas com este material.

Os cimentos romanos disponíveis no mercado permitem reconstituir os elementos decorativos de fachadas necessários para manter a arquitetura original dos edifícios, tal como se pode verificar na Figura 9. Para que as argamassas de cimento romano obtenham a cor coincidente com os materiais dos edifícios a restaurar, podem ser utilizados diferentes cimentos romanos, agregados de cor ou adicionados pigmentos.



Figura 9. Restauro de elementos decorativos da Estação da Eletricidade, em Cracóvia, Polónia
(Fonte: Kozłowski, 2012)

É ainda de referir a existência de variadas técnicas apropriadas para a limpeza das fachadas e para a remoção de camadas de revestimento de cimento romano (Figura 10).

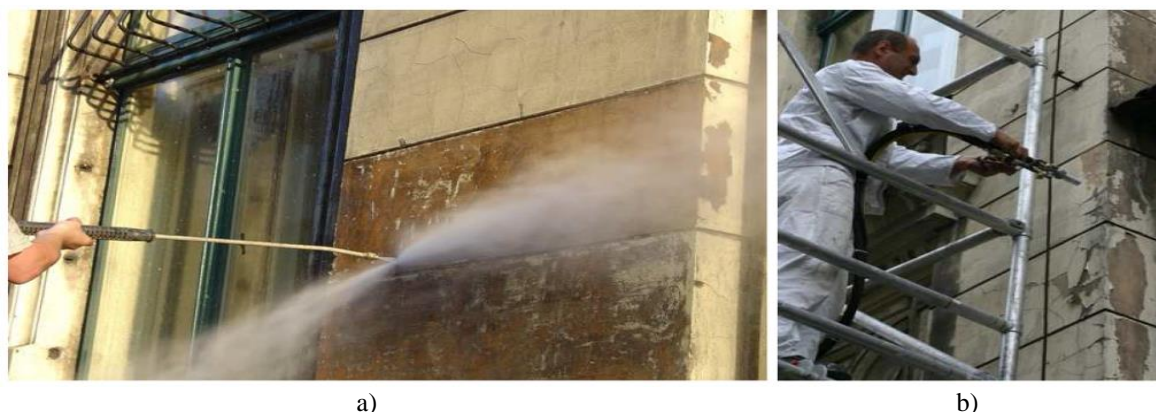


Figura 10. Exemplos de técnicas de limpeza de fachadas de cimento romano
a) Limpeza com jato de água aquecida b) Limpeza com jato de areia (Fonte: Kozłowski, 2012)

Apesar de a argamassa de cimento romano apresentar vantagens indiscutíveis, algumas desvantagens ainda permanecem, predominando a alta capacidade de absorção de água por capilaridade. A água pode penetrar através da argamassa e causar infiltrações de sais solúveis em água e depósitos a partir da argamassa original ou de ambientes urbanos sujos (Klisinska-Kopacz *et al.*, 2012).

É também de referir que a aplicação de argamassas com imitação das propriedades das argamassas originais não apresenta garantias de compatibilidade material, uma vez que ambos os materiais evoluem no decorrer do tempo. Como as propriedades das argamassas de restauro podem variar devido à interação das argamassas frescas com o suporte durante o endurecimento, várias combinações de suportes históricos e argamassas de restauro devem ser estudadas (Klisińska-Kopacz *et al.*, 2010).

5.1.2. Novas áreas de aplicação

As características técnicas dos cimentos romanos tornam-nos adequados para muitas outras aplicações que não apenas as relacionadas com os edifícios históricos.

Apesar de a produção de cimentos romanos ser ainda limitada, estão disponíveis no mercado variados cimentos romanos com diferentes propriedades:

- Cores que variam do cinzento ao avermelhado;
- Resistências à compressão que variam de baixa a muito alta;
- Vários tempos de presa e endurecimento.

É de referir que é a excelente atividade capilar deste material que salienta a sua aplicação para além do domínio histórico. Assim, este material pode ser indicado para os seguintes campos de aplicação:

- Argamassas de reboco com capilaridade ativa para fachadas com maior resistência às intempéries;
- Argamassa com capilaridade ativa para enchimento de juntas;
- Argamassa de reboco com capilaridade ativa e excelente respirabilidade para paredes interiores;
- Fabrico de elementos moldados de qualquer tipo.

5.2. Projetos de investigação sobre cimentos romanos

A utilização de cimentos romanos foi inicialmente orientada para as aplicações históricas durante o século XIX e inícios do século XX e posteriormente para trabalhos de restauro e conservação das fachadas desse período. Foi no âmbito destas aplicações do cimento romano que surgiram dois projetos colaborativos, financiados pela Comissão Europeia: o ROCEM e posteriormente o ROCARE.

Estes dois projetos de investigação tinham como objetivo estudar e reintroduzir as tecnologias do cimento romano, combinando o conhecimento deste material com aspetos modernos de fabrico, utilização e comercialização. Foram assim realizados ensaios laboratoriais e estudos para compreender totalmente a hidratação do cimento e o desenvolvimento das suas propriedades. Foram também otimizadas as tecnologias de processo, em diferentes condições de produção, de forma a se ampliar esta tecnologia a um nível mais competitivo no mercado.

O ROCARE continuou o trabalho desenvolvido pelo ROCEM, resultando deste projeto colaborativo uma norma. A referida norma aplica-se ao cimento romano utilizado para preparação de argamassas para uso na conservação/restauro e para preparação de grouts, argamassas ou betões aplicados a atividades de construção contemporânea que se aproveitam das propriedades particulares do cimento romano. Esta norma classifica os diferentes tipos de cimento romano, fornecendo os requisitos necessários para as propriedades físicas e químicas que dependem do tipo de cimento romano.

Capítulo 6

Procedimento Experimental

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem como objetivo a descrição da campanha experimental desenvolvida em laboratório.

Inicialmente são abordadas as formulações e características das argamassas a preparar em laboratório, sendo também descrito todo o plano de ensaios a realizar.

A fase seguinte deste capítulo diz respeito aos procedimentos experimentais realizados, sendo referidas três fases distintas: procedimentos experimentais em matérias-primas, procedimentos experimentais no estado fresco e procedimentos experimentais no estado endurecido.

6.1. Formulação de argamassas de substituição

Neste subcapítulo pretende-se o desenvolvimento de argamassas que sejam mecânica, química e fisicamente compatíveis com as argamassas a utilizar na conservação do património edificado Português. Procura-se assim uma argamassa que apresente uma boa trabalhabilidade e um desempenho eficaz perante os requisitos estabelecidos para uma argamassa de revestimento.

Para a realização das argamassas de substituição utilizaram-se diferentes matérias-primas: água; areia de rio como agregado; cal hidráulica natural NHL 3,5, cimento Portland CEM I 42,5R, cal aérea CL90 e três cimentos naturais diferentes como ligantes; cinzas de cortiça como aditivo; retardador de presa; e água.

É de referir que a areia utilizada como agregado tratava-se de areia siliciosa de rio, encontrando-se esta seca, limpa e sem qualquer tipo de impurezas que pudessem afetar os resultados do trabalho. Da mesma forma, os restantes materiais não sofreram qualquer alteração, tendo sido utilizados diretamente dos sacos ou embalagens em que são comercializados.

As argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland foram formuladas de modo a que fosse possível obter valores padrão que permitissem estabelecer intervalos de comparação para as restantes argamassas. A cal hidráulica natural NHL 3,5 tratava-se de cal hidráulica

natural da marca SECIL e o cimento Portland tratava-se de cimento Portland CEM I 42,5R da Cimpor.

A introdução de cal aérea nas argamassas permitiria obter argamassas com diferentes características, motivo pelo qual seria importante estudar a influência da sua introdução nas argamassas. A cal aérea utilizada tratava-se de cal aérea CL90 H100 da Lusical.

Por sua vez, os cimentos naturais são os principais ligantes em estudo. De modo a aprofundar o conhecimento sobre o comportamento deste material, optou-se por recorrer a três tipos diferentes de cimento romano, sendo realizadas as mesmas formulações com traço em volume, para cada um dos cimentos.

Tal como já foi referido no Capítulo 3, atualmente poucas são as empresas que produzem cimento romano, sendo que a maioria delas o produz em pequenas quantidades, apenas a nível regional ou apenas a pedido. Assim, estando condicionada a escolha dos cimentos romanos a utilizar, optou-se por recorrer ao Cimento Natural Prompt Vicat, ao Cimento Natural Marfil e ao Cimento Natural Rápido Tigre.

É importante salientar que, segundo o projeto ROCARE, o cimento Natural Prompt Vicat e o Cimento Natural Rápido Tigre são de Classe B (resistência à compressão $<5,0$ MPa e $>1,0$ MPa a uma idade de 3 horas). No entanto, o Cimento Natural Marfil não foi testado no referido projeto.

A introdução de cortiça seria interessante, uma vez que permitiria obter argamassas com diferentes características, que possivelmente minimizariam a condutibilidade térmica das argamassas, tirando partido de um resíduo da indústria corticeira e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Optou-se assim pela introdução de cinzas de cortiça fornecidas pela DOFcork. Estas cinzas foram utilizadas em argamassas em quantidade igual a 10% a massa de cimento natural, possibilitando assim avaliar a influência deste material nas argamassas em estudo.

De modo a avaliar a presa das argamassas de cimento natural, optou-se pela introdução de retardador de presa Plastiment VZ da Sika, não devendo este ser utilizado em quantidades superiores a 0,5% a massa de cimento natural.

Para a formulação das argamassas a estudar, foram considerados os ligantes hidráulicos acima referidos e a sua mistura com cal aérea, variando o tipo de ligante e a razão ligante/agregado.

Na Tabela 1 encontram-se representadas as formulações efetuadas, com as respetivas designações e traços volumétricos.

Tabela 1. Formulações efetuadas, com respetivas designações e traços volumétricos

Designação	Ligante	Traço Volumétrico (ligante:agregado)
1	Cal Hidráulica Natural NHL 3,5	1:2
2	Cal Hidráulica Natural NHL 3,5 + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:2
3	Cimento Natural Prompt Vicat	1:0,5
4	Cimento Natural Prompt Vicat	1:1
5	Cimento Natural Prompt Vicat	1:2
6	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25:1
7	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1
8	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25;1,5
9	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1,5
10	Cimento Portland CEM I 42,5R	1:2
11	Cimento Portland CEM I 42,5R + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:2
12	Cimento Natural Marfil	1:0,5
13	Cimento Natural Marfil	1:1
14	Cimento Natural Marfil	1:2
15	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25:1
16	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1
17	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25;1,5
18	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1,5
19	Cimento Natural Tigre	1:0,5
20	Cimento Natural Tigre	1:1
21	Cimento Natural Tigre	1:2
22	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25:1
23	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1
24	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	0,75:0,25;1,5
25	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	0,5:0,5:1,5
26	Cimento Prompt Vicat + Cortiça (10%)	1:2
27	Cimento Natural Marfil + Cortiça (10%)	1:2
28	Cimento Natural Tigre + Cortiça (10%)	1:2
12.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	1:0,5
13.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	1:1
14.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	1:2
19.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	1:0,5
20.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	1:1
21.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	1:2

Tal como é possível verificar na Tabela 1, para cada um dos cimentos romanos foram consideradas três argamassas cujo ligante é unicamente o referido cimento. O projeto ROCARE aconselha traços de 1:0,5 a 1:3, motivo pelo qual se optou pelos traços referidos na

Tabela 1. De forma semelhante, o projeto ROCARE aconselha o traço 1:1,5 para argamassas bastardas, motivo pelo qual se optou por quatro argamassas de traços 1:1 e 1:1,5 para testar a adição de cal aérea em quantidade inferior e igual à do cimento romano.

6.2. Descrição do plano de ensaios

6.2.1. Plano de ensaios

O procedimento experimental incide essencialmente em ensaios no estado endurecido de provetes de argamassas. No entanto, é também importante referir os procedimentos experimentais realizados nas matérias-primas e no estado fresco, sendo os últimos realizados sobre todas as argamassas efetuadas e destinando-se a garantir a homogeneidade das argamassas utilizadas nos diferentes provetes.

Como referido anteriormente, a primeira fase experimental corresponde a ensaios efetuados às matérias-primas, tendo-se iniciado esta etapa no início de Fevereiro de 2015. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Determinação da massa volúmica aparente seca;
- Análise de fluorescência de raios-X (FRX);
- Análise de difração de raios-X (DRX);
- Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

A fase seguinte corresponde à produção dos provetes, sendo que os procedimentos realizados seguiram a seguinte ordem:

- Produção de argamassas;
 - Execução da amassadura;
 - Ensaio de consistência por espalhamento;
 - Determinação da percentagem de água de amassadura;
- Moldagem, cura e desmoldagem dos provetes.

Decorrido o tempo de cura, cujas condições serão posteriormente especificadas, os provetes foram ensaiados no estado endurecido. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Ensaio de resistência à tração por flexão;
- Ensaio de resistência à compressão;
- Determinação da profundidade de carbonatação;
- Ensaio de absorção de água por capilaridade;
- Ensaio de permeabilidade ao vapor de água;
- Análise de difração de raios-X (DRX);
- Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

6.2.2. Sistema de identificação e produção dos provetes

Antes de se iniciarem os ensaios a realizar com os diferentes provetes, estabeleceu-se um sistema de identificação que permite a diferenciação entre os vários provetes e argamassas. Definiu-se assim uma designação simples que, como se pode verificar na Tabela 1, se baseia na numeração ordinária das argamassas e na indicação do dia de realização das mesmas.

É de salientar a identificação dos provetes relativos às argamassas com adição de retardador de presa, onde esta corresponde a um código composto por numeração ordinária e por uma letra maiúscula.

O primeiro parâmetro diferenciador no código é a utilização do número da argamassa correspondente sem a utilização de retardador de presa. Imediatamente à identificação da argamassa sem utilização de retardador de presa segue-se a letra “R”, inicial da palavra “retardador”. Por último, o terceiro parâmetro é representado por um número representativo da percentagem de retardador adicionada.

Para a realização dos procedimentos experimentais referidos anteriormente, foram produzidos provetes prismáticos e provetes cilíndricos.

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, foram produzidos provetes cilíndricos (Figura 11) com espessuras entre 1 e 2 cm e uma área de aproximadamente $0,013\text{m}^2$. Foram assim produzidos 25 provetes cilíndricos, relativos às argamassas com designação 1 a 25.



Figura 11. Provetes cilíndricos

Para os restantes ensaios, para cada formulação foram produzidos 6 provetes prismáticos (Figura 12) de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, de acordo com a norma NP 196-1.



Figura 12. Provetes prismáticos

6.3. Procedimentos experimentais para caracterização de matérias-primas

Como referido anteriormente, a primeira fase experimental corresponde a ensaios efetuados às matérias-primas.

Para a produção das argamassas é necessário determinar a massa volúmica aparente seca dos materiais, parâmetro característico dos mesmos. Assim, foi inicialmente determinada a massa volúmica aparente seca dos materiais para que posteriormente fossem calculadas as quantidades necessárias de cada material, para as diferentes argamassas.

De modo a aprofundar o estudo das matérias-primas, foram também efetuadas análises químicas e mineralógicas, realizadas respetivamente por fluorescência de raios-X (FRX) e por difração de raios-X (DRX). Estas análises são de grande importância para que seja possível comparar a composição dos ligantes em estudo, essencialmente dos cimentos naturais utilizados nas argamassas de substituição.

Uma vez que as cinzas de cortiça eram a matéria-prima de que dispúnhamos a menor quantidade de informação, optou-se por realizar com amostras deste material um ensaio complementar de microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

6.3.1. Determinação da massa volúmica aparente seca

Tal como foi referido anteriormente, para a produção das argamassas foi inicialmente determinada a massa volúmica aparente seca das matérias-primas que compõem as argamassas em estudo. Esta determinação foi efetuada segundo a norma EN 1015-6:1998, tendo sido realizada antes da execução dos provetes, de modo a determinar as quantidades de agregado e ligantes necessárias.

Para a realização deste ensaio pesou-se um recipiente vazio, com capacidade de 1 litro. Posteriormente, com o auxílio de uma pá encheu-se o recipiente com a matéria-prima cuja massa volúmica aparente seca se pretende determinar. Por fim, não compactando o material, é necessário nivelar a superfície e pesar o conjunto.

É importante salientar que para o enchimento ser uniforme, o bordo da pá nunca deverá estar a mais de 5cm de distância do topo do recipiente, devendo todo este procedimento ser repetido três vezes, de modo a ser determinado o valor médio da massa volúmica aparente seca.

6.3.2. Análise de fluorescência de raios-X (FRX)

A análise de fluorescência de raios-X permite determinar a composição química e a percentagem dos elementos químicos presentes nas amostras ensaiadas.

Para o presente estudo foram realizados ensaios de fluorescência de raios-X em amostras de todas as matérias-primas, sendo os ensaios realizados no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, recorrendo a um Espectrómetro de Florescência Philips PW 1400 X-Ray.

Para o ensaio em questão utilizou-se uma amostra de cada uma das matérias-primas a utilizar nas argamassas de substituição, sendo necessário pelo menos 12 g de fração fina, passada pelo peneiro <75 μm .

Com este ensaio é possível obter uma análise qualitativa da amostra, identificando os elementos presentes, e também quantitativa uma vez que é estabelecida a proporção de cada elemento. Esta análise é de grande importância essencialmente na comparação dos cimentos naturais utilizados nas argamassas de substituição.

6.3.3. Análise de difração de raios-X (DRX)

A análise de difração de raios-X consiste numa análise mineralógica que permite identificar as fases cristalinas presentes nos compostos numa amostra de um dado material sólido.

Para o presente estudo foram realizados ensaios de difração de raios-X em amostras de todas as matérias-primas, sendo os ensaios realizados no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, recorrendo a uma base de dados ICDD e usando como equipamento um Difractómetro de Raios-X Philips X-Pert Pró.

Para o ensaio em questão utilizou-se uma fração fina de cada uma das matérias-primas a utilizar nas argamassas de substituição, obtendo-se com este ensaio uma análise mineralógica que se expressa através de um difratograma onde se encontram os registos pertencentes aos diversos compostos existentes nas matérias-primas.

A análise é sobretudo qualitativa, focando-se na identificação dos compostos em fase cristalina e não na sua quantificação exata. No entanto, por comparação da intensidade dos picos do difratograma é possível saber, em termos de proporção, quais os compostos presentes em maior quantidade. Como referido anteriormente, esta análise é de grande importância essencialmente na comparação dos cimentos naturais utilizados nas argamassas de

substituição. Assim, se forem comparadas amostras destes materiais é possível verificar qual a amostra que terá mais ou menos quantidade de um determinado composto (Fontes, 2013).

6.3.4. Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

Para análise dos materiais quase sempre se torna necessário analisar a sua microestrutura, sendo esta análise importante uma vez que permite entender a ligação da sua microestrutura com as suas propriedades e possíveis defeitos (Sencadas, 2005), fornecendo informações como a topografia da superfície, a composição e a estrutura cristalográfica (Smith, 1999).

A análise de microscopia eletrónica de varrimento (Figura 13) apenas foi realizada em amostras de cinzas de cortiça, de modo que fosse possível obter o máximo de informação sobre esta matéria-prima. O ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, usando como equipamento um Microscópio Eletrónico de Varrimento SEM, da marca Hitachi, modelo SU-70.

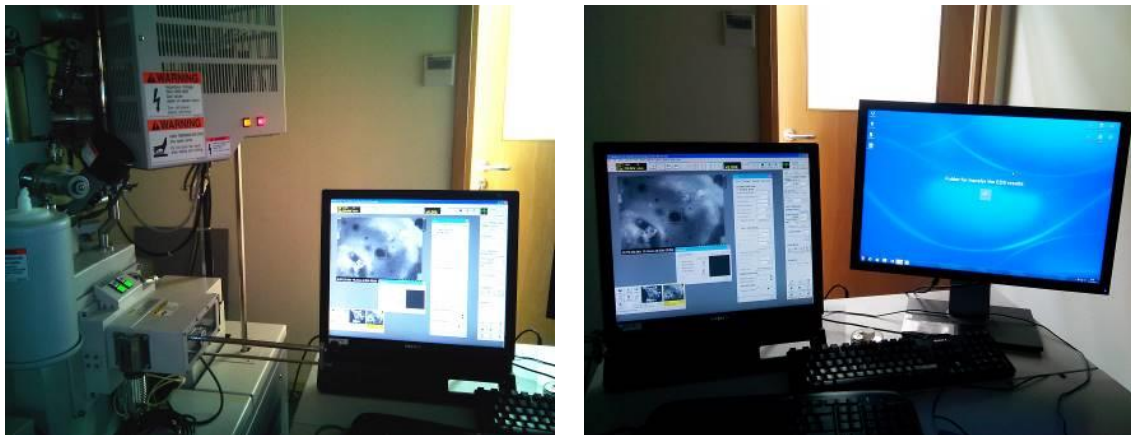


Figura 13. Registo fotográfico da análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

6.4. Procedimentos experimentais no estado fresco

No presente subcapítulo são descritos todos os procedimentos de ensaio a realizar nas argamassas em estado fresco. Para além de todos os procedimentos inerentes à produção das argamassas é também descrito o modo de acondicionamento dos provetes.

6.4.1. Produção de argamassas

A produção das argamassas foi realizada segundo a norma EN 1015-2:1998, tendo-se iniciado pela recolha de quantidades suficientes de material a partir das embalagens de saco (Figura 14), que de acordo com as recomendações do fabricante, foram armazenados em lugar seco, não sujeito a calor e humidade.



Figura 14. Embalagens de saco dos cimentos naturais utilizados

A preparação das argamassas foi efetuada de modo a garantir uma boa homogeneização da mistura dos agregados e ligantes com a água. Para tal optou-se por misturar primeiramente os componentes secos, pesando-os, colocando-os em sacos plásticos e agitando (Figura 15).



Figura 15. Mistura dos componentes secos

6.4.1.1. Amassadura de argamassas

O processo de fabrico é semelhante para as diferentes argamassas em estudo, diferindo apenas nos tempos de mistura, que se foram adaptando à medida que se foi aprofundado o conhecimento sobre as matérias-primas utilizadas.

Tal como mencionado anteriormente, a produção das argamassas foi realizada segundo a norma EN 1015-2:1998, tendo-se optado por misturar primeiramente os componentes secos, colocando-os em sacos plásticos e agitando.

Para a amassadura, o aparelho utilizado na preparação das argamassas foi uma amassadora/misturadora mecânica, com características mencionadas na norma EN 196-1:2005.

O processo de amassadura inicia-se pela colocação, no recipiente da misturadora, da quantidade de água necessária (Figura 16.a)). Cuidadosamente adicionam-se os componentes secos à água (Figura 16.b)) e homogeneiza-se manualmente, tentando evitar perdas de material quando se inicie o funcionamento da misturadora mecânica. Após esta mistura manual, efetua-se a mistura mecânica dos componentes (Figura 16.c)), a uma baixa velocidade, durante 15 segundos. Terminado este tempo de homogeneização, raspa-se com uma espátula o material não envolvido na pá da misturadora e nas paredes laterais da cuba, completando-se a homogeneização da mistura na amassadora por mais 75 segundos.

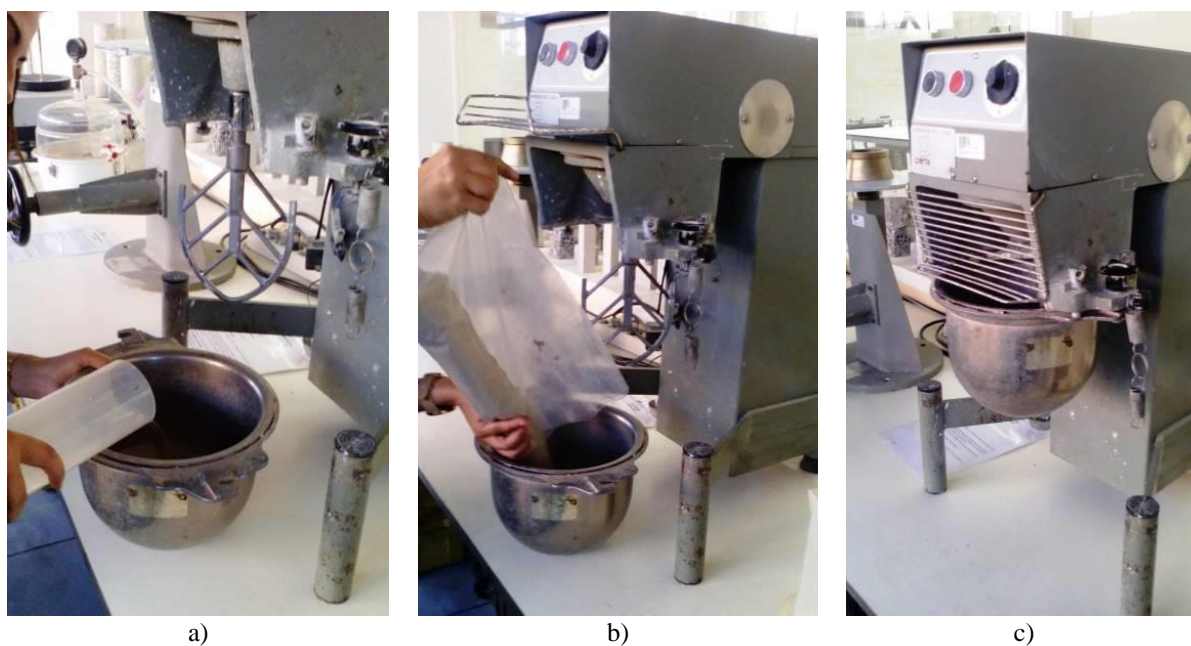


Figura 16. Processo de amassadura de argamassas

6.4.1.2. Ensaio de consistência por espalhamento

A trabalhabilidade é uma propriedade de grande importância numa argamassa, estando esta relacionada com a sua facilidade de aplicação ou moldagem. No presente estudo, a trabalhabilidade é um dos requisitos exigidos, uma vez que este se baseia em argamassas cuja finalidade é a sua aplicação como revestimento.

A quantidade de água de amassadura é um fator importante na hidratação dos ligantes, no caso de cimentos e cals hidráulicas, que terá influência no valor da sua consistência (Rodrigues, 2004). É assim possível avaliar a consistência de uma dada argamassa no estado fresco recorrendo ao ensaio de espalhamento, parâmetro este que poderá ser avaliado pela trabalhabilidade.

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-3:1999, iniciando-se com a colocação de um molde tronco-cônico no centro da mesa de espalhamento (Figura 17). É neste molde que será introduzida a argamassa fresca.

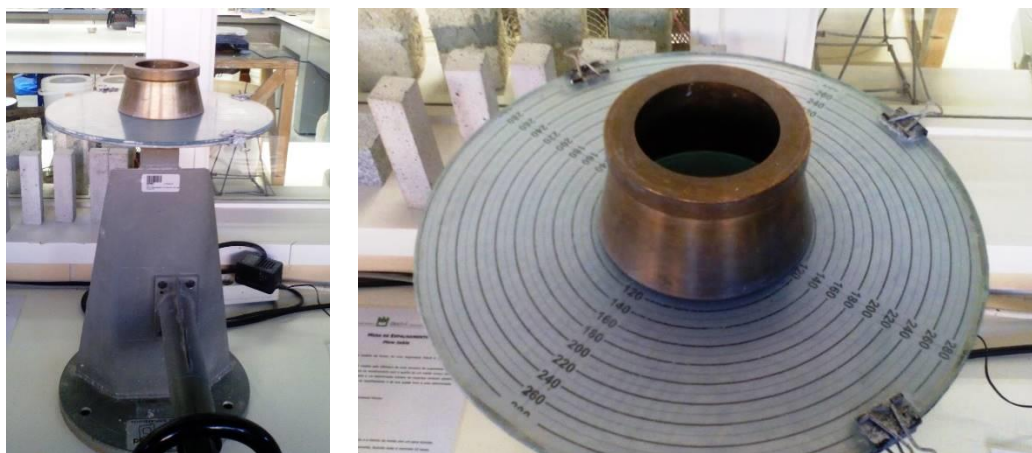


Figura 17. Mesa de espalhamento com molde tronco-cônico

De modo a garantir o enchimento uniforme do molde, este deve ser enchido com argamassa fresca até metade da sua capacidade, devendo esta primeira camada ser compactada com pelo menos 10 pancadas efetuadas com o pilão. Posteriormente o molde deve ser totalmente enchido, novamente compactado com 10 pancadas e rasado à superfície com uma espátula, de modo a retirar a argamassa em excesso (Figura 18.a)).

Após esta primeira fase, o molde pode ser retirado (Figura 18.b)) e a argamassa deve ser submetida a 15 pancadas, rodando a manivela da mesa de espalhamento durante 15 segundos a uma frequência constante de uma pancada por segundo, permitindo o espalhamento da argamassa (Figura 18.c)).

É assim possível registar os diâmetros medidos em duas direções perpendiculares, em milímetros, na mesa de espalhamento, considerando posteriormente o valor médio.

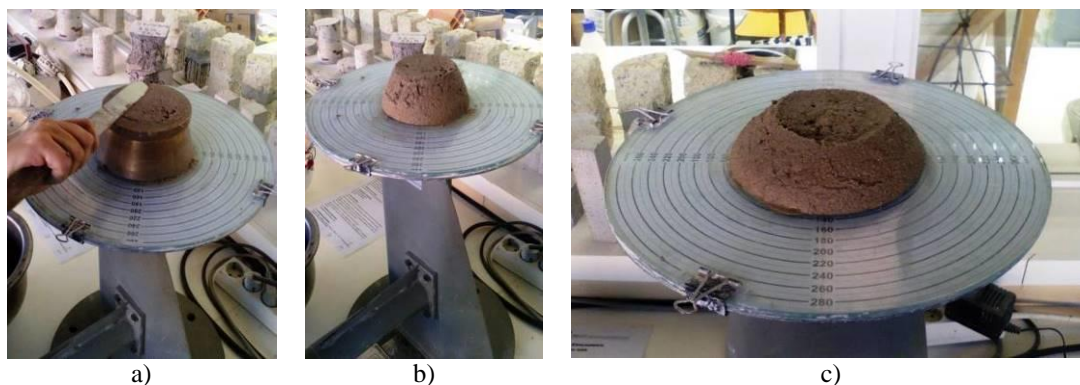


Figura 18. Processo de determinação de consistência por espalhamento

Para se obter uma boa trabalhabilidade das argamassas em estudo, pretendia-se um espalhamento de aproximadamente 140 mm. Para tal, durante o processo de amassadura a quantidade de água adicionada foi sendo ajustada, de modo a que se atingisse a trabalhabilidade pretendida.

É de referir que a realização deste ensaio nem sempre se revelou de fácil execução, devido ao rápido início de presa das argamassas de cimento romano.

6.4.1.3. Determinação da percentagem de água de amassadura

Tal como mencionado no subcapítulo anterior, para que fosse atingido um espalhamento de aproximadamente 140 mm, durante o processo de amassadura a quantidade de água foi sendo ajustada. Para cada formulação foram produzidos 3 kg de argamassa, optando-se por utilizar inicialmente 400 g de água, adicionando posteriormente a quantidade de água necessária para ser alcançada a trabalhabilidade pretendida.

Para cada argamassa realizada, a quantidade de água utilizada foi sendo registada, de forma que fosse possível determinar a percentagem de água de amassadura.

6.4.2. Moldagem, cura e desmoldagem de provetes

Para a conceção dos provetes com as dimensões que se pretendiam, recorreu-se à utilização de moldes metálicos para os provetes prismáticos e moldes de PVC para os provetes cilíndricos, tendo-se optado por estes moldes devido ao facto de serem os disponíveis no laboratório.

Tal como já referido, foram utilizados dois tipos de moldes: de PVC, cilíndricos, de diâmetro 13 cm e de espessura 2 cm, e prismáticos com dimensões 40 x 40 x 160 mm³. Assim, os diferentes tipos de provetes foram obtidos com moldes com as dimensões exatamente pretendidas, bastando desmoldar os provetes para que estes estivessem prontos a ensaiar.

A produção dos provetes foi realizada de acordo com a norma EN 1015-2:1998, e inicia-se com a aplicação de óleo desmoldante no interior dos moldes (Figura 19).

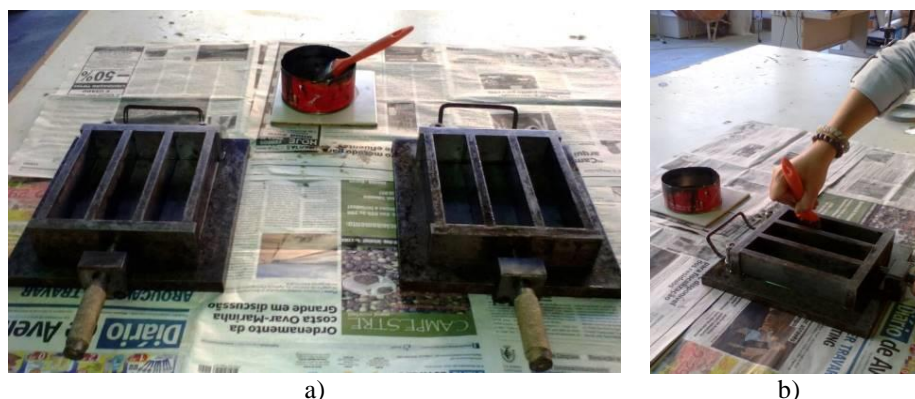


Figura 19. Aplicação de óleo desmoldante no interior dos moldes

Após a aplicação do óleo desmoldante, o molde prismático é enchido até meio, acondicionando-se e compactando-se a argamassa com um pilão prismático (Figura 20.a)). Posteriormente enche-se a totalidade do molde, repetindo-se o acondicionamento da argamassa com uma espátula e compactando-a novamente com o auxílio de um pilão prismático (Figura 20.b)). Para completar a compactação, o molde deve ser elevado cerca de 5 cm de um dos lados e deixado cair sobre a mesa de trabalho, repetindo-se algumas vezes este procedimento. Por fim a superfície superior do molde deve ser nivelada com uma espátula, removendo o excesso de argamassa que se pode encontrar no molde e obtendo uma superfície plana (Figura 20.c)).

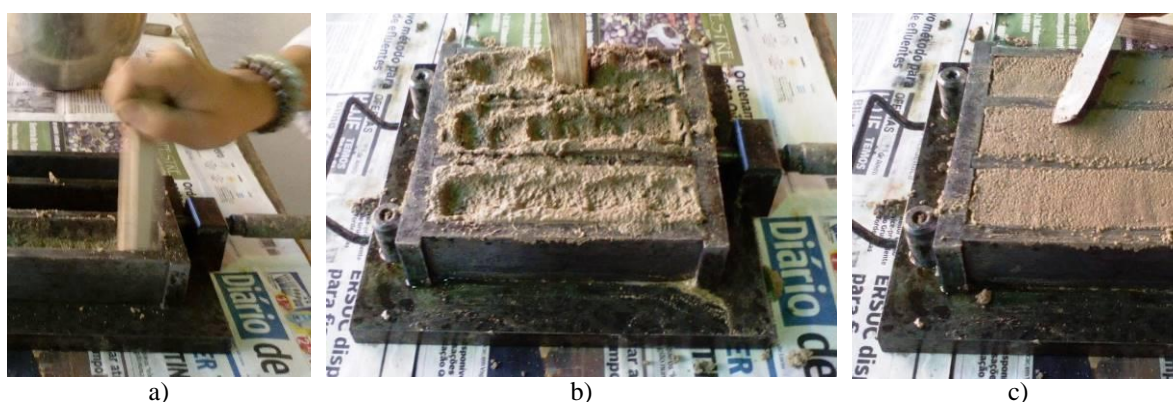


Figura 20. Moldagem de provetes prismáticos

Por sua vez, o preenchimento dos moldes cilíndricos foi executado de uma só vez e com a ajuda de uma espátula (Figura 21). A espátula funciona como meio de compactação, não havendo um processo rigoroso como no caso dos provetes prismáticos.

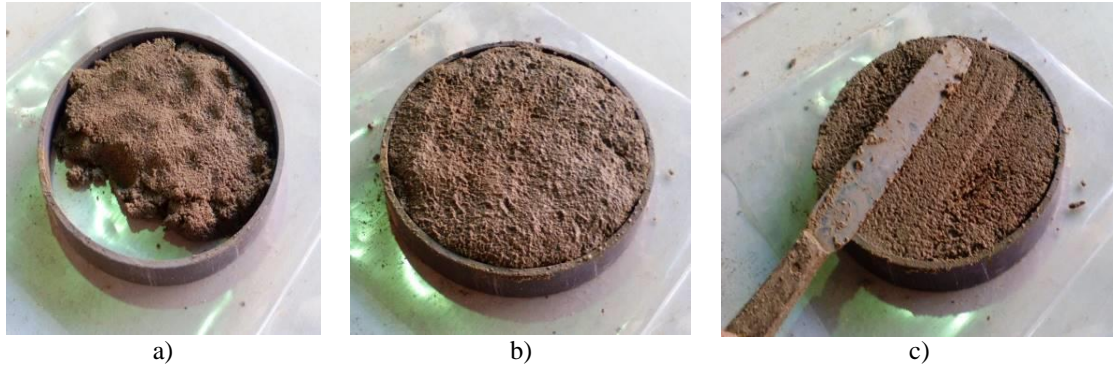


Figura 21. Moldagem de provetes cilíndricos

Executados os provetes, a cura dos mesmos foi realizada em câmaras climáticas, segundo a norma EN 1015-11:1999. Durante um período de 7 dias, os provetes ficam sujeitos a condições controladas de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $95\% \pm 5\%$ de humidade relativa. Nos 2 primeiros dias os provetes devem permanecer nos moldes, sendo posteriormente desmoldados (Figura 22.a)) e guardados na mesma câmara climática até completarem os 7 dias (Figura 22.b)). Completados os primeiros 7 dias de cura, os provetes devem ser colocados o restante tempo de cura numa câmara climática a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ de humidade relativa. É de referir que os provetes prismáticos serão ensaiados com tempos de cura distintos: 28 dias, 60 dias e 90 dias. Por sua vez, os provetes cilíndricos serão ensaiados ao fim de 28 dias de cura.



Figura 22. a) Desmoldagem de provetes; b) Condicionamento de provetes a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $95\% \pm 5\%$ de humidade relativa

É importante identificar claramente as argamassas existentes nos moldes. Para tal optou-se por utilizar em cada molde um pedaço de papel com a indicação do número da respetiva

argamassa. No entanto, após dois dias de cura, no momento de desmoldagem, este método de identificação das argamassas é substituído pela sua escrita nos próprios provetes (Figura 23).



Figura 23. Exemplo de identificação de argamassas e provetes

6.5. Procedimentos experimentais no estado endurecido

No presente subcapítulo são descritos os ensaios e respetivos procedimentos, realizados em provetes relativos às argamassas de substituição.

O estudo foi iniciado com ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão, sendo completado com a determinação da profundidade de carbonatação. De modo a avaliar o comportamento das argamassas de substituição face à água, realizaram-se também ensaios de absorção de água por capilaridade e de permeabilidade ao vapor de água. O estudo terminou com análises de difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

6.5.1. Ensaio de resistência à tração por flexão

Os procedimentos experimentais realizados em provetes iniciaram-se com o ensaio de resistência à tração por flexão, sendo o primeiro ensaio destrutivo. Devido ao elevado número de argamassas a ensaiar e ao limitado número de moldes disponíveis em laboratório, para cada argamassa apenas foram realizados 6 provetes. Considerando que os provetes serão ensaiados aos 28, 60 e 90 dias, para cada tempo de cura serão ensaiados à tração por flexão 2 provetes.

Desta forma, os provetes ensaiados à tração por flexão serão posteriormente utilizados nos ensaios seguintes, nomeadamente na resistência à compressão, no controlo de carbonatação e na absorção de água por capilaridade.

Este ensaio decorreu segundo a norma EN 1015-11:1999. Os provetes a ensaiar devem ser colocados no equipamento sobre os sistemas de apoio, distando estes 100 mm entre si. É importante que o provete seja corretamente centralizado sobre os apoios, de modo que a força exercida seja aplicada perpendicularmente e a meio dos provetes.

Para a realização deste ensaio foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca SHIMADZU, modelo IC 100 kN, tendo sido usadas as células de carga de 5 kN e 100 kN (Figura 24.a)). As cargas referidas devem ser aplicadas com uma velocidade constante de 10 N/s, até se atingir a rotura dos provetes (Figura 24.b)).

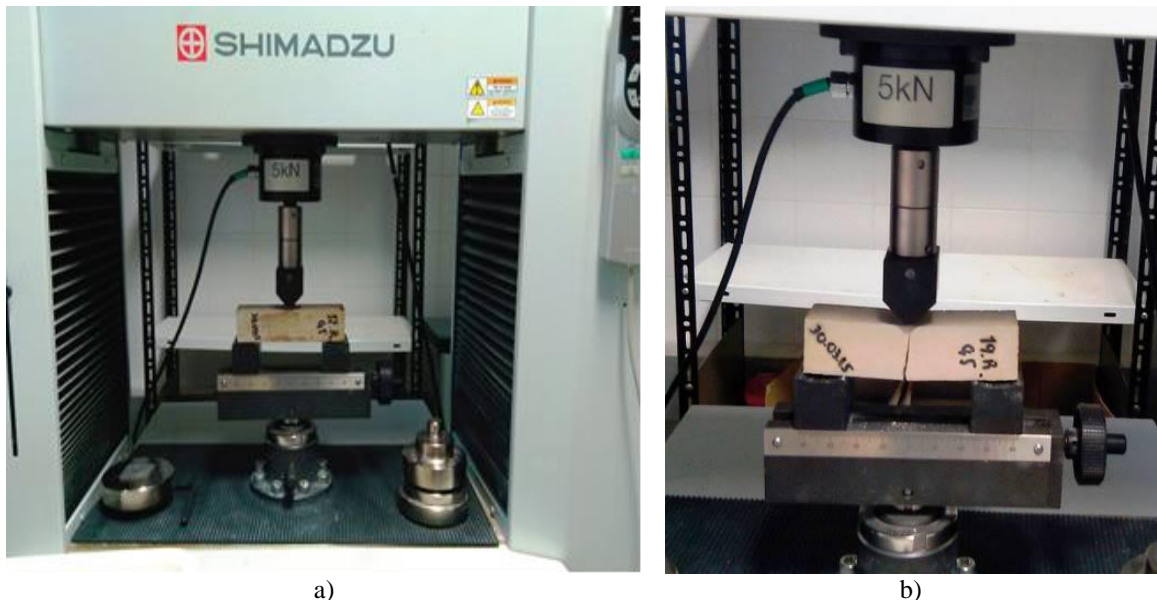


Figura 24. Registo fotográfico de ensaio de resistência à tração por flexão:
a) equipamento utilizado no ensaio de um provete; b) rotura à tração de um provete

No presente estudo, considera-se como valor da tensão de rotura à tração por flexão a média dos valores obtidos nos 2 provetes ensaiados. A resistência à tração por flexão do provete é dada através da expressão seguinte:

$$Rf = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad [N/mm^2]$$

Equação 1. Resistência à flexão

Sendo,

F – carga máxima aplicada, N;

L – distância entre os eixos de apoio do provete, mm ($L = 100$ mm);

b – largura do provete, mm ($b = 40$ mm);

d – espessura do provete, mm ($d = 40$ mm).

6.5.2. Ensaio de resistência à compressão

Após a realização do ensaio de resistência à tração por flexão, os meios provetes resultantes podem ser ensaiados à compressão. Considerando que dos 2 provetes ensaiados à tração por flexão resultam 4 meios provetes: um deles é utilizado para o ensaio de absorção de água por capilaridade e os 3 restantes são utilizados para o ensaio de resistência à compressão.

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11:1999, recorrendo à mesma máquina de ensaios e ao mesmo procedimento utilizados para o ensaio de resistência à tração por flexão. Também neste ensaio foram aplicadas as células de carga de 5 kN e 100 kN, sendo as cargas aplicadas a uma velocidade constante de 50 N/s, de forma gradual e contínua, levando a amostra até à rotura (Figura 25).

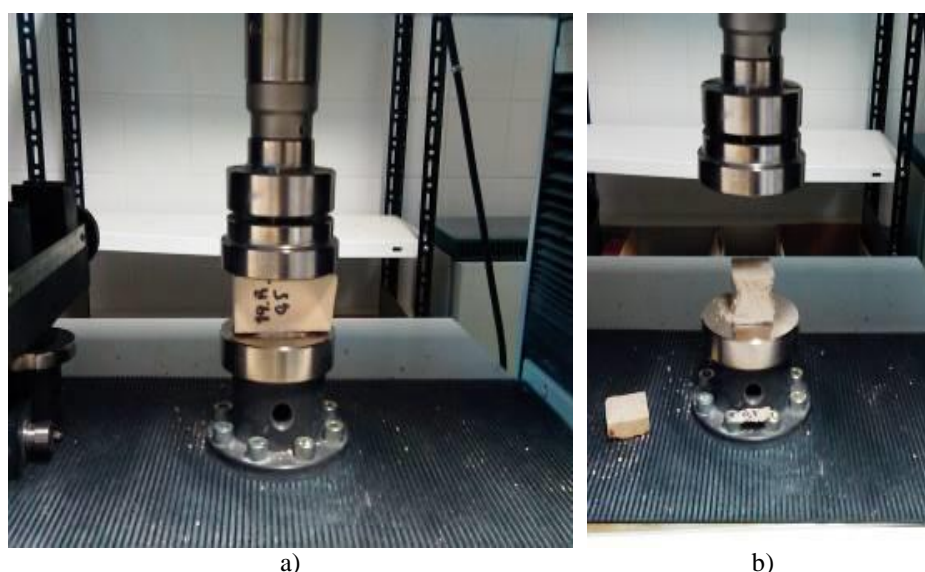


Figura 25. Registo fotográfico de ensaio de resistência à compressão:
a) provete sujeito a ensaio de compressão; b) rotura à compressão de um provete

No presente estudo, considera-se como valor da tensão de rotura à compressão a média dos valores obtidos nos 3 meios provetes ensaiados. A tensão de rotura à compressão do provete é dada pelo quociente entre a carga máxima e a área de secção transversal onde é aplicada a força, sendo expressa pela expressão seguinte:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [N/mm^2]$$

Equação 2. Resistência à compressão

Sendo:

F_c – força de rotura, N;

A – área de secção comprimida, mm^2 .

6.5.3. Determinação da profundidade de carbonatação

Após a conclusão do ensaio de compressão é possível o controlo da carbonatação, recorrendo à aplicação de uma solução alcoólica de fenolftaleína nas superfícies de rotura resultantes do ensaio de compressão. As superfícies quebradas são pulverizadas com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,2%, que em contacto com material de pH alcalino presente nas argamassas, reage mudando de cor.

A fenolftaleína é um indicador de pH que adota cor rosa em meio alcalino, não-carbonatado e se mantém incolor em meios neutros ou ácidos, carbonatados (Figura 26.a)) (Cardeira, 2010). Assim, com auxílio de uma craveira é possível medir e registar a profundidade de carbonatação observada na secção de rotura de cada provete (Figura 26.b)).



a)



b)

Figura 26. Registo fotográfico de determinação de profundidade de carbonatação: a) aspeto de provetes carbonatados e não-carbonatados; b) medição da profundidade de carbonatação

6.5.4. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Atualmente existem bastantes estudos focados na importância da porosidade de um material. Nas argamassas, a absorção de água pode fazer-se fundamentalmente de duas formas: devido a pressão hidráulica associada normalmente a imersão e por capilaridade. Na absorção por capilaridade, normalmente há apenas uma face em contacto com a água, e a absorção desenvolve-se por fenómenos de sucção, em sentido contrário ao da gravidade (Pereira, 2008).

A capilaridade entende-se assim como a capacidade de uma argamassa absorver água, de forma natural, sem se exercer pressão. Desta forma, a capilaridade apresenta grande importância na qualidade de uma argamassa, uma vez que absorvida água por capilaridade haverá uma diminuição da durabilidade e do desempenho da mesma.

O ensaio de absorção de água por capilaridade segue o procedimento estabelecido na norma EN 1015-18:2002. Neste ensaio são utilizadas amostras de dimensões regulares e de secção constante, que são colocadas em absorção parcial através da sua face inferior. Um geotêxtil deve ser colocado dentro de um tabuleiro com água, onde posteriormente devem ser colocados os provetes de ensaio (Figura 27). Devem ser realizadas pesagens periódicas, retirando-se os provetes do recipiente, limpando com papel absorvente a superfície em contacto com a lâmina de água, pesando os provetes e colocando-os novamente no tabuleiro.



Figura 27. Registo fotográfico do ensaio de absorção de água por capilaridade

Analisando a evolução da quantidade de água absorvida por unidade de superfície dos provetes, em função da raiz quadrada do tempo, é possível obter um gráfico que exprime nas ordenadas a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete e nas abcissas a raiz quadrada do tempo decorrido. Nesse gráfico, obtém-se uma curva cujo troço inicial é um segmento de reta que passa pela origem, e cujo declive corresponde à velocidade

de absorção de água nos instantes iniciais, sendo este o coeficiente de absorção de água por capilaridade (Páscoa, 2012).

6.5.5. Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

A capacidade de secagem é uma das características essenciais para avaliar o comportamento de uma argamassa face à água, sendo esta um dos principais agentes de degradação das argamassas de revestimento. Quando ocorre a entrada de água, as argamassas devem possibilitar a sua saída quando as condições atmosféricas o permitam (Veiga, 1998), devendo ser suficientemente permeáveis ao vapor de água para que a água não fique retida no interior (Santos, 2009). A permeabilidade ao vapor é definida como o fluxo de vapor de água que atravessa a argamassa, em condições de equilíbrio, por unidade de superfície e pressão de vapor, consistindo a sua avaliação na quantificação do vapor de água permeado através da espessura de um provete quando se estabelece um gradiente de pressão parcial do vapor de água entre duas das suas superfícies (Páscoa, 2012).

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água segue o procedimento estabelecido na norma NP EN 1015-19:2000, realizando-se com os provetes cilíndricos após um período de cura de 28 dias. Como referido, foram produzidos apenas 25 provetes cilíndricos, relativos às argamassas com designação 1 a 25. As argamassas com adição de cortiça e retardador não foram ensaiadas. Para a realização deste ensaio foi utilizada uma câmara climática da marca ESPEC, modelo ARL-0680 (Figura 28).



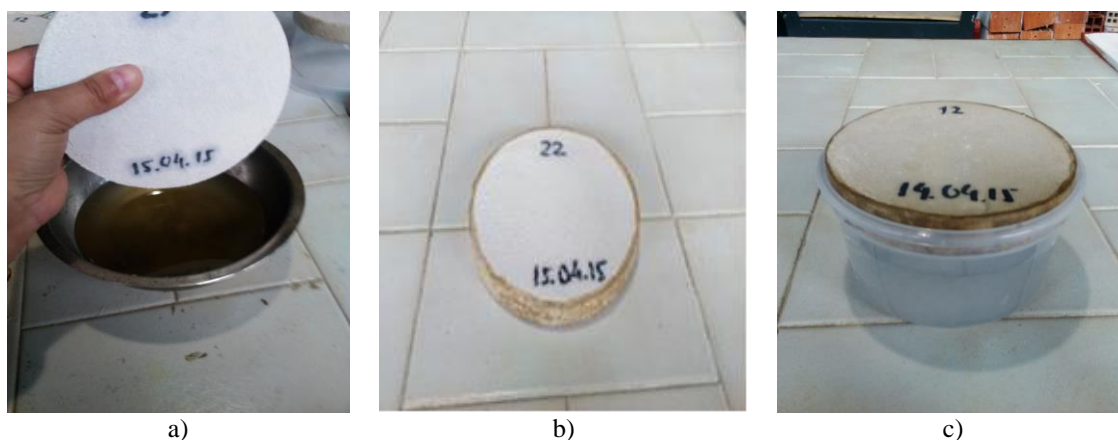
Figura 28. Equipamento utilizado em ensaio de permeabilidade ao vapor de água

Neste ensaio é utilizado o método da “cápsula húmida”, em que um provete é colocado sobre uma cápsula que contém no seu interior, uma solução salina de nitrato de potássio (KNO_3). A referida solução foi preparada em laboratório, tal como se pode verificar na Figura 29, originando dentro da cápsula uma humidade relativa de 93,2% a uma temperatura de 20°C. Esta humidade relativa mostra-se superior à existente na câmara climática, originando um fluxo de humidade de dentro para fora da cápsula. É de referir que a solução deve ser colocada na cápsula de modo a que a distância entre o topo da cápsula e o topo da solução seja no mínimo 1 cm, de modo que se evite molhar o conjunto (cápsula com solução + provete) sempre que este seja movido.



Figura 29. Preparação de solução salina de nitrato de potássio (KNO_3)

O provete deve ser selado lateralmente com parafina líquida (Figura 30.a) e Figura 30.b)) e colocado no topo do molde, com a face mais rugosa em contacto com o exterior (Figura 30.c)). O conjunto deve ser selado com silicone, garantindo a estanqueidade do conjunto e permitindo que a área do ensaio a considerar nos cálculos passa a ser a face superior do provete.



a)

b)

c)

Figura 30. Preparação de conjunto para ensaio de permeabilidade ao vapor:

- a) selagem lateral de provete com parafina líquida; b) provete selado lateralmente com parafina líquida;
c) conjunto (cápsula com solução + provete)

Concluída a preparação dos conjuntos, pesa-se cada um, sendo posteriormente armazenados numa câmara climática que se deve encontrar a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $95\% \pm 5\%$ de humidade relativa (Figura 31).



Figura 31. Conjuntos armazenados em câmara climática

As pesagens prosseguiram, registando-se diariamente, durante 31 dias, a massa dos conjuntos e o tempo decorrido desde o início do ensaio até ao momento. O registo das massas que se vão ocorrendo permite conhecer a perda de massa, variação esta que diz respeito ao fluxo de vapor unidirecional que atravessa o provete.

6.5.6. Análise de difração de raios-X (DRX)

Tal como mencionado anteriormente, a análise de difração de raios-X consiste numa análise mineralógica que permite identificar as fases minerais presentes em amostras, possibilitando o estudo das suas estruturas cristalinas.

Para o presente estudo foram realizados ensaios de difração de raios-X em amostras de todas as argamassas, sendo os ensaios realizados no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, recorrendo a uma base de dados ICDD e usando como equipamento um Difractómetro de Raios-X Philips X-Pert Pró.

Para o ensaio em questão utilizou-se uma fração fina de cada uma das argamassas de substituição em estudo. Para tal foram utilizados pequenos pedaços de argamassa resultantes

dos ensaios mecânicos já realizados, sendo estes posteriormente moídos em almofariz e passados pelo peneiro $<75\text{ }\mu\text{m}$. O processo de preparação das amostras encontra-se registado fotograficamente na Figura 32.



Figura 32. Preparação de amostras para DRX

A análise é sobretudo qualitativa, focando-se mais na identificação dos compostos em fase cristalina e não na sua quantificação exata. No entanto, ensaiando amostras das mesmas argamassas mas com diferentes tempos de cura, é possível saber, em termos de proporção, quais os compostos presentes em maior quantidade e quando se formaram.

6.5.7. Análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

Tal como referido anteriormente, para análise dos materiais é quase sempre necessário analisar a sua microestrutura, sendo esta análise bastante importante uma vez que permite compreender a ligação da sua microestrutura com as suas propriedades.

No presente estudo foram realizados ensaios de microscopia eletrónica de varrimento em amostras de algumas argamassas, sendo os ensaios realizados no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e usando como equipamento um Microscópio Eletrónico de Varrimento SEM, da marca Hitachi, modelo SU-70. Para o ensaio em questão foram utilizados pequenos pedaços de argamassa resultantes dos ensaios mecânicos já realizados.

É importante referir que devido ao elevado número de argamassas, apenas algumas argamassas foram escolhidas para ser ensaiadas. As argamassas ensaiadas apresentam características que se julgam ser também representativas das argamassas não ensaiadas.

Capítulo 7

Apresentação e Discussão de Resultados

7. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo analisar a viabilidade das argamassas de substituição em estudo, para utilização em reabilitação. Para tal são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios referidos no Capítulo 6, sendo consideradas as três fases já referidas: procedimentos experimentais para caracterização de matérias-primas, procedimentos experimentais no estado fresco e procedimentos experimentais no estado endurecido.

7.1. Procedimentos experimentais para caracterização de matérias-primas

7.1.1. Análise visual

As matérias-primas utilizadas no presente estudo apresentam uma grande diversidade de cores, variando estas entre o branco, o cinzento e o castanho.

A cal aérea e a cal hidráulica NHL 3,5 são os materiais que apresentam as cores mais claras, correspondendo estas a branco e cinzento claro, respetivamente. Por suas vez, ao cimento Portland corresponde a cor mais escura, o cinzento escuro.

Relativamente ao cimento romano, os três cimentos utilizados apresentam tons que variam na gama do castanho.

7.1.2. Determinação da massa volúmica aparente seca

A determinação da massa volúmica aparente seca dos materiais, parâmetro característico dos mesmos, permitiu que fossem calculadas as quantidades necessárias de cada material.

Na Tabela 2 é apresentada a massa volúmica aparente seca de cada material constituinte das argamassas de substituição em estudo.

Tabela 2. Massa volúmica aparente seca dos materiais utilizados

Componente	Massa volúmica aparente seca (kg/m³)
Cal Aérea CL 90	384,52
Cal Hidráulica Natural NHL 3,5	744,00
Cimento Natural Prompt Vicat	791,15
Cimento Natural Marfil	847,33
Cimento Natural Rápido Tigre	910,67
Cimento Portland CEM I 42,5R	1073,03
Areia de rio siliciosa	1559,00

Na Tabela 2 os materiais encontram-se por ordem crescente da sua massa volúmica aparente, sendo possível verificar que a cal aérea CL90 apresenta o valor mais baixo e o cimento Portland e a areia de rio siliciosa apresentam os valores mais elevados. A cal hidráulica natural NHL 3,5 e os cimentos naturais apresentam valores compreendidos entre 744 kg/m³ e 910.67 kg/m³, sendo que a cal hidráulica natural NHL 3,5 e o Cimento Natural Prompt Vicat apresentam menores massas volúmicas e os restantes cimentos naturais apresentam maiores massas volúmicas.

7.1.3. Análise química por fluorescência de raios-X (FRX)

Na Tabela 3 encontram-se representados os resultados quantitativos relativos ao ensaio por fluorescência de raios-X, preconizando os maiores componentes presentes em cada amostra.

Tabela 3. Resultados obtidos por FRX de amostras dos materiais utilizados

Amostra	Na₂O (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	SO₃ (%)	Cl (%)	K₂O (%)	CaO (%)	TiO₂ (%)	MnO (%)	Fe₂O₃ (%)	LOI (%)
NHL 3,5	0,16	1,79	2,66	8,71	0,04	2,33	0,01	1,07	62,73	0,19	0,03	1,74	18,46
CL90	-	3,09	0,01	-	0,01	-	-	0,02	76,74	0,04	0,01	0,15	20,45
Cimento Vicat	0,16	3,11	5,93	13,44	0,05	4,12	0,01	1,25	50,47	0,24	0,06	2,85	18,05
Cimento Marfil	0,15	1,46	7,83	18,96	0,06	3,50	0,01	1,50	52,18	0,37	0,07	2,97	10,77
Cimento Tigre	0,32	5,99	5,26	16,32	0,07	2,16	0,02	1,39	51,61	0,25	0,05	2,32	13,64
Cimento Portland	0,15	1,42	3,46	13,51	0,05	4,54	0,04	1,48	62,13	0,26	0,04	2,97	9,84
Areia	-	-	2,01	96,45	0,02	-	-	1,14	0,09	0,09	0,01	0,20	0,22

Analisando a Tabela 3, verifica-se que os ligantes em estudo apresentam uma elevada percentagem de óxido de cálcio (CaO), resultando em valores que variam entre os 50% e os 77% (excluindo a areia, cuja percentagem de óxido de cálcio corresponde a 0,1%). Analogamente ao óxido de cálcio, as amostras ensaiadas apresentam também percentagens consideráveis de dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), encontrando-se o primeiro na ordem dos 9% e os 19% e o segundo na ordem dos 3% e os 8%.

No entanto, as amostras analisadas apresentam ainda percentagens consideráveis de óxido sulfúrico (SO₃), óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K₂O) e óxido de ferro (Fe₂O₃). É de salientar que o terceiro componente principal do Cimento Portland é o óxido sulfúrico e do Cimento Natural Tigre é o óxido de Magnésio.

Desta forma é possível afirmar que os três cimentos naturais apresentam composições químicas semelhantes, destacando-se no entanto o Cimento Natural Tigre por apresentar algumas diferenças relativamente aos restantes cimentos naturais. Como referido, o principal componente dos três cimentos naturais é o óxido de cálcio, com percentagens que variam entre os 50% e os 52%, correspondendo o primeiro valor ao Cimento Prompt Vicat e o segundo valor ao Cimento Natural Marfil. O segundo componente mais presente nestes ligantes é a sílica, com percentagens que variam entre os 13% e os 19%, correspondendo o primeiro valor ao Cimento Prompt Vicat e o segundo ao Cimento Natural Marfil. No entanto, é no terceiro componente mais presente nestes ligantes que se encontra uma maior diferença. O Cimento Prompt Vicat e o Cimento Natural Marfil apresentam como terceiro maior componente a alumina, com percentagens correspondentes de 6% e 8%. Por sua vez, o Cimento Natural Tigre, apesar de apresentar uma percentagem semelhante de alumina (5%), o seu terceiro maior componente é o óxido de magnésio (6%).

Salienta-se assim que o Cimento Natural Tigre apresenta uma maior percentagem de óxido de magnésio relativamente aos restantes cimentos naturais. A quantidade de óxido de magnésio existente neste cimento pode vir a revelar-se diferenciadora, uma vez que a existência de sais com magnésio pode influenciar a estrutura das argamassas que incorporem este cimento.

É ainda de referir a presença de óxido de sódio (Na₂O) e cloro (Cl) nas amostras. Apesar das suas percentagens serem muito baixas, são valores indicadores da presença de sais nas suas composições, sendo também o Cimento Natural Tigre que apresenta a maior percentagem de óxido de sódio.

Tabela 4. Resultados obtidos por FRX de amostra de cinzas de cortiça

Cinzas de cortiça	Na₂O (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	SO₃ (%)	Cl (%)	K₂O (%)	CaO (%)	TiO₂ (%)	MnO (%)	Fe₂O₃ (%)	LOI (%)
	3,17	0,73	1,08	3,80	1,13	2,53	23,29	27,51	19,24	0,33	0,25	1,21	15,34

Analisando a Tabela 4 é possível verificar que a amostra de cinzas de cortiça apresenta elevadas percentagens de óxido de potássio (28%), cloro (23%) e óxido de cálcio (19%). Os componentes dióxido de silício (4%), óxido de sódio (3%) e óxido sulfúrico (3%) apresentam valores significativos, sendo também de referir componentes como o óxido de ferro (1%), o pentóxido de fósforo (1%) e o óxido de alumínio (1%).

7.1.4. Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX)

Na Tabela 5 e nas Figuras 33 e 34 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada.

Tabela 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX)

Material	Fórmula Química	Nome Comum
Areia siliciosa de rio	SiO ₂	Quartzo
	KAlSi ₃ O ₈	Microcline
Cal Hidráulica Natural NHL 3,5	Ca(OH) ₂	Portlandite
	Ca ₂ SiO ₄	Larnite
	SiO ₂	Quartzo
	Ca(CO ₃)	Calcite
Cal Aérea CL 90	Ca(OH) ₂	Portlandite
	Ca(CO ₃)	Calcite
Cimento Natural Prompt Vicat	Ca ₂ SiO ₄	Belite
	Ca(CO ₃)	Calcite
	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Celite
	Ca ₃ SiO ₅	Alite
	SiO ₂	Quartzo
Cimento Natural Marfil	Ca ₂ SiO ₄	Belite
	Ca(CO ₃)	Calcite
	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Celite
	Ca ₃ SiO ₅	Alite
	SiO ₂	Quartzo
Cimento Natural Rápido Tigre	Ca(CO ₃)	Calcite
	Ca ₂ SiO ₄	Belite
	SiO ₂	Quartzo

Cimento Portland CEM I 42,5R	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	Celite
	Ca_3SiO_5	Alite
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Calcite
	Ca_3SiO_5	Alite
	Ca_2SiO_4	Belite
	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	Ferrite
	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	Aluminato Tricálcico
Cinzas de Cortiça	SiO_2	Quartzo
	CaSO_4	Anidrite
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Calcite
	KCl	Silvite

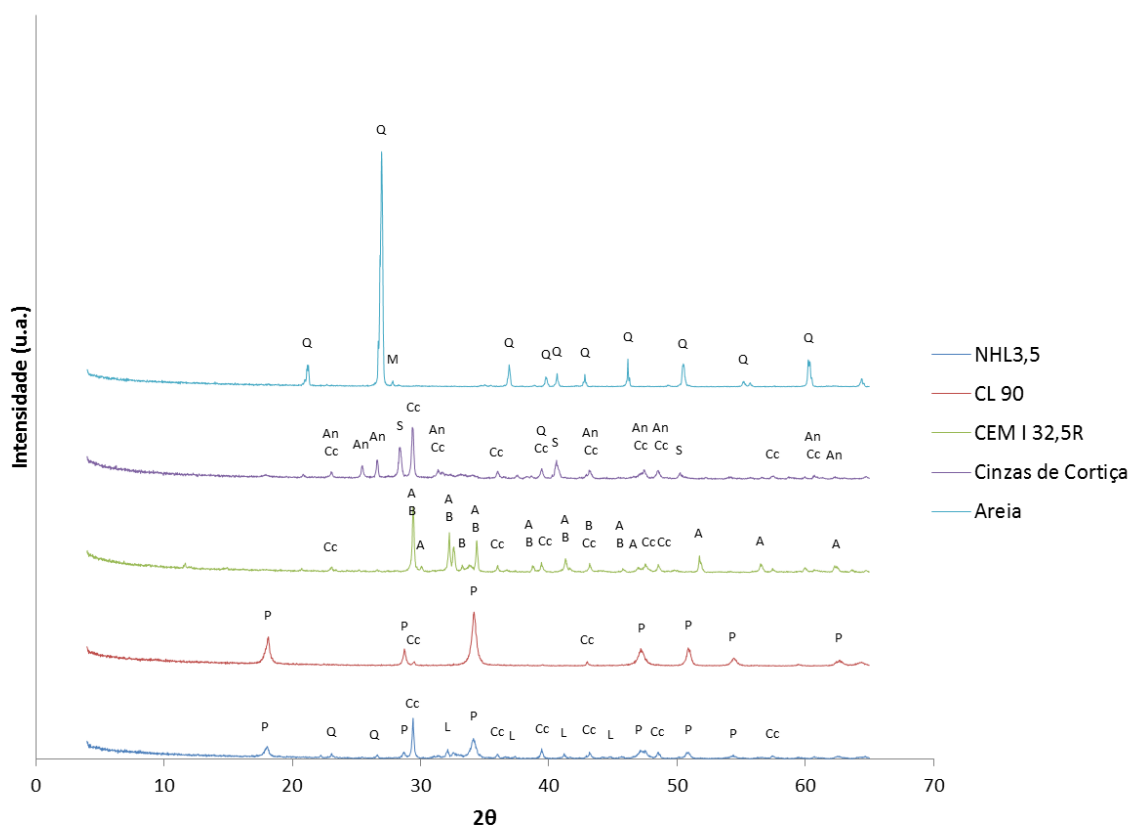


Figura 33. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX)
 Q – Quartzo M – Microcline An – Anidrite Cc – Calcite S – Silvite
 A – Alite B – Belite P – Portlandite L – Larnite

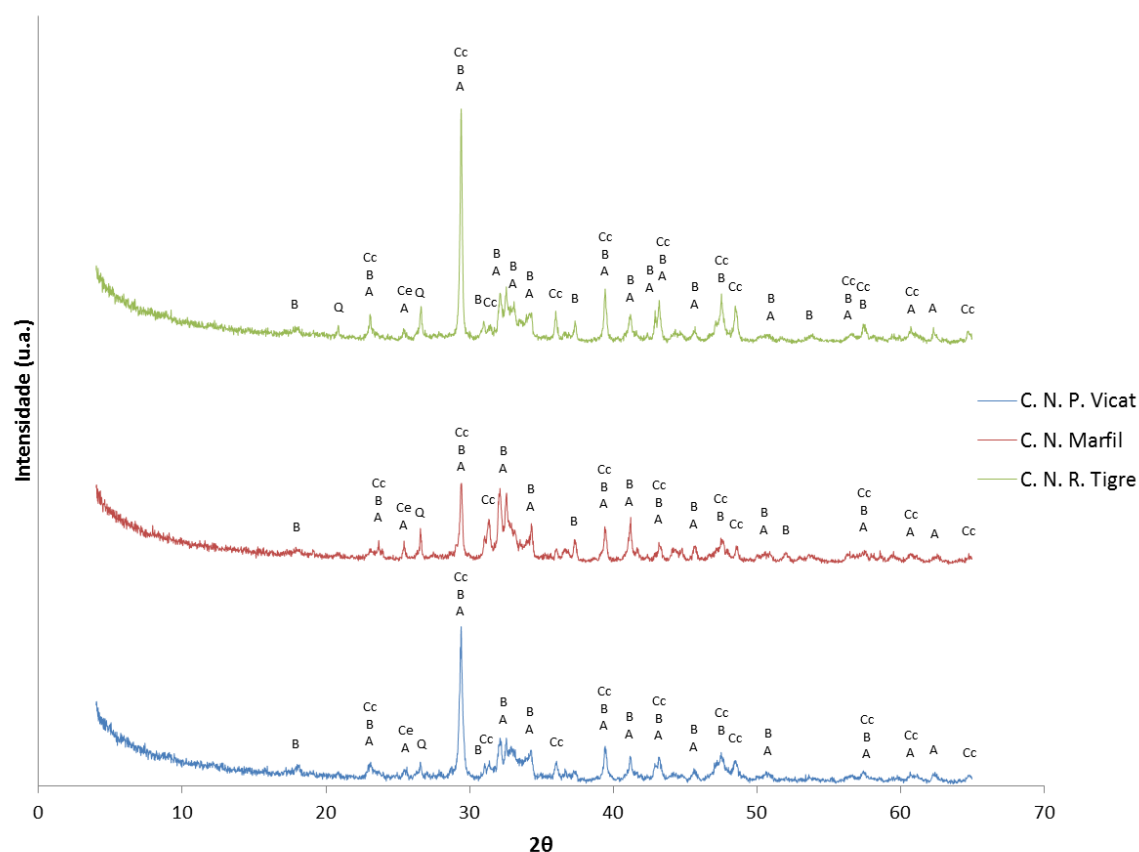


Figura 34. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX)
A – Alite B – Belite Cc – Calcite Ce – Celite Q – Quartz

Analisando a Tabela 5 e os difratogramas representados na Figura 33 é possível verificar que a cal hidráulica natural NHL3,5 e a cal aérea CL90 apresentam composições similares, verificando-se a presença de portlandite e calcite, comuns aos dois materiais. A presença destes minerais é comprovada com a elevada percentagem de óxido de cálcio (CaO) detetada para estes materiais na análise de fluorescência de raios-X. No entanto, a amostra de NHL3,5 apresenta também larnite e quartzo, comprovando o dióxido de silício (SiO₂) também detetado no ensaio de FRX.

A portlandite é usualmente conhecida por hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), sendo no caso da cal hidráulica natural proveniente da reação de extinção da cal viva por hidratação. Esta reação é necessária pois a cal hidráulica necessita de ser extinta após ser cozida. No caso da cal aérea, a portlandite é o mineral consumido na carbonatação, mecanismo responsável pelo endurecimento das argamassas de cal aérea.

Os resultados obtidos para as amostras de cimento Portland e areia foram de encontro ao esperado. Na amostra de cimento Portland os compostos em maior proporção são a calcite, a

alite e a belite, podendo este facto ser confirmado pelos valores de óxido de cálcio e dióxido de silício obtidos na análise de fluorescência de raios-X.

Na composição do cimento Portland verifica-se também ferrite e aluminato tricálcico, minerais que confirmam os valores de alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) também obtidos no ensaio de FRX. Por sua vez, a areia revelou ser composta maioritariamente por quartzo, apresentando o difratograma um pequeno pico relativo à microcline. Estes resultados podem ser confirmados analisando a Tabela 3, relativa ao ensaio de FRX, onde é possível verificar que a composição química da areia se baseia em dióxido de silício, alumina e óxido de potássio (K_2O).

Relativamente à amostra de cinzas de cortiça, a análise do difratograma permite identificar dois grandes picos, sendo eles correspondentes à silvite e à anidrite, apresentando também calcite e quartzo na sua composição. A presença de silvite pode facilmente ser verificada pelas elevadas percentagens de óxido de potássio e cloro, detetados nas análises químicas. Por sua vez, a anidrite pode ser verificada analisando os resultados das análises químicas presentes na Tabela 3, onde é possível verificar a existência de óxido de cálcio e óxido sulfúrico (SO_3).

Na Figura 34 encontram-se representados os difratogramas referentes aos três cimentos naturais. Analisando a Tabela 5 e a Figura 34, é possível verificar que os três ligantes revelam composições similares, destacando-se novamente o Cimento Natural Tigre por apresentar algumas diferenças relativamente aos restantes cimentos naturais.

Para os três cimentos em estudo, os maiores picos correspondem à calcite, larnite e alite, verificando-se também a presença de quartzo e celite. Tal como foi possível verificar na análise química, o teor de cálcio é similar nos três cimentos. No entanto, a análise mineralógica permite verificar que o Cimento Natural Tigre é de facto diferente dos restantes cimentos naturais, encontrando-se o cálcio sob a forma de calcite e não tanto de minerais hidráulicos, como se verifica nos restantes cimentos.

Sendo a calcite e a alite, dois dos principais componentes das margas, as elevadas proporções destes compostos já eram esperadas. De uma forma geral, a presença destes minerais é comprovada com as elevadas percentagens de óxido de cálcio e dióxido de silício, detetadas para estes materiais na análise de fluorescência de raios-X.

O mesmo se verifica para a larnite, usualmente conhecida por belite quando nos referimos a cimentos. Tal como referido no Capítulo 4, o cimento romano apresenta como fase reativa de

silicatos a belite, formada de cal e silicatos existentes dentro da argila da marga e de cal que migra internamente para os cristais de quartzo. Como mencionado, o ensaio de DRX indica também a existência de celite, cuja presença é comprovada pela existência de alumina.

7.1.5. Análise microscópica por microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

De forma a aprofundar o conhecimento sobre as cinzas de cortiça a incorporar nas argamassas, optou-se por analisar a sua microestrutura, recorrendo à técnica de microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

A amostra em estudo foi também analisada relativamente à sua constituição química, recorrendo à microanálise com sonda EDS, que consiste na identificação dos elementos químicos presentes na amostra sobre a qual se faz incidir um feixe de eletrões. Esta análise permite não só identificar os elementos presentes na amostra mas também estabelecer a distribuição espacial de um ou mais elementos, numa dada região da amostra.

Nas Figuras 35 a 40 apresentam-se as micrografias da superfície da amostra, com os respetivos espectros de EDS, observando-se que esta apresenta morfologias bastante diferentes, com composições diversas.

As cinzas de cortiça apresentam assim na sua composição partículas com diferentes proporções, maioritariamente cálcio (Ca), alumínio (Al), silício (Si), potássio (K), cloro (Cl), sódio (Na), fósforo (P) e enxofre (S), apresentando por vezes titânio (Ti) e ferro (Fe). Esta grande variedade origina assim diferentes morfologias.

Analisando a Figura 35.a) é possível verificar uma partícula irregular com várias estruturas em forma de bola ligadas à partícula principal. Esta partícula encontra-se ampliada na Figura 35.b), sendo composta principalmente por silício (Figura 35.d)). Verificam-se também a existência de alguns poros negros, que adicionalmente contêm alumínio e ferro (Figura 35.c)).

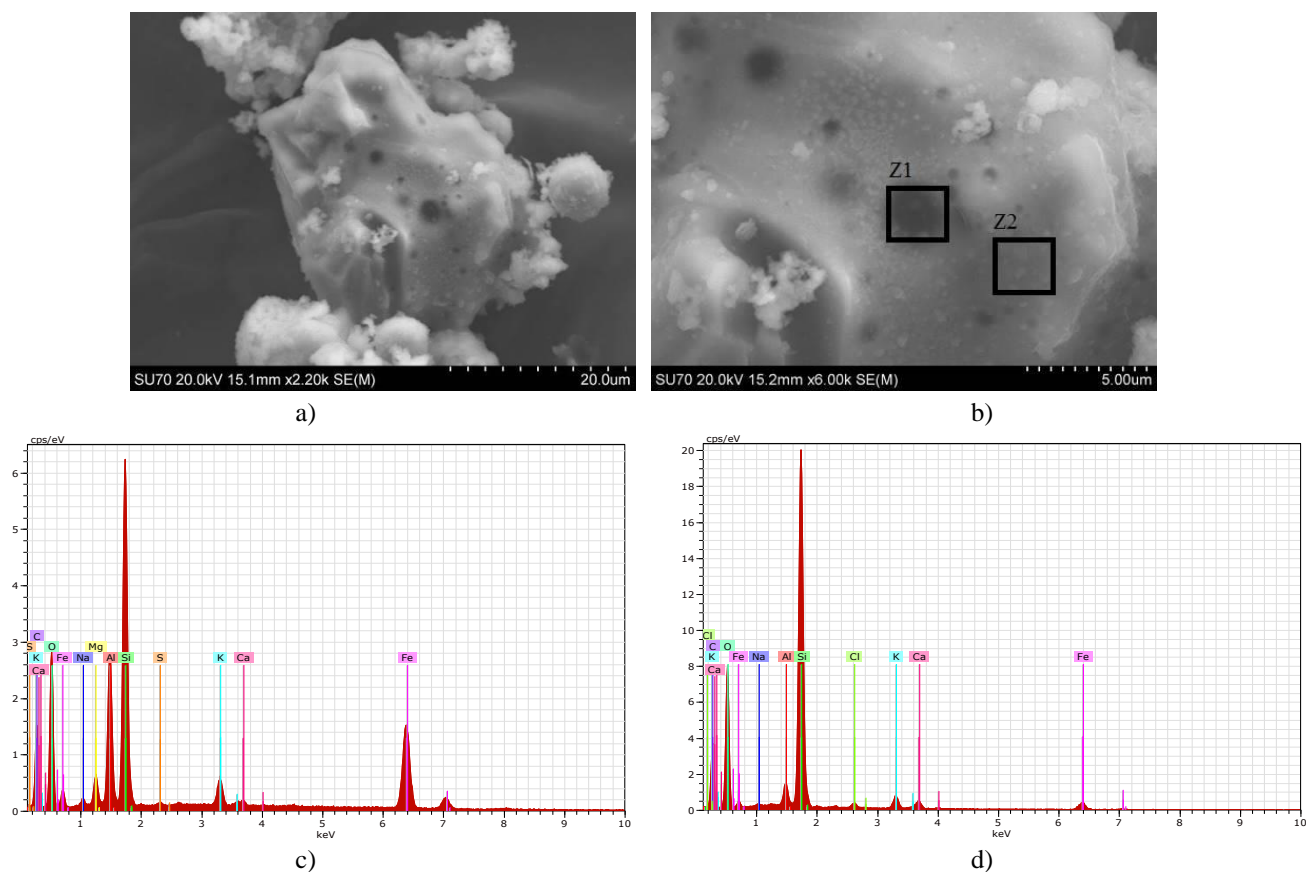


Figura 35. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; c) Espectro EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectro EDS da zona Z2 identificada na micrografia

As Figuras 36, 37 e 38 revelam morfologias ricas em cálcio, devendo-se a existência deste composto à calcite, cuja existência foi verificada por DRX. Na Figura 36 é possível verificar uma estrutura em forma de bola, que além de apresentar cálcio na sua composição, apresenta também fósforo, enxofre, potássio e cloro, sendo estes dois últimos provenientes de silvite.

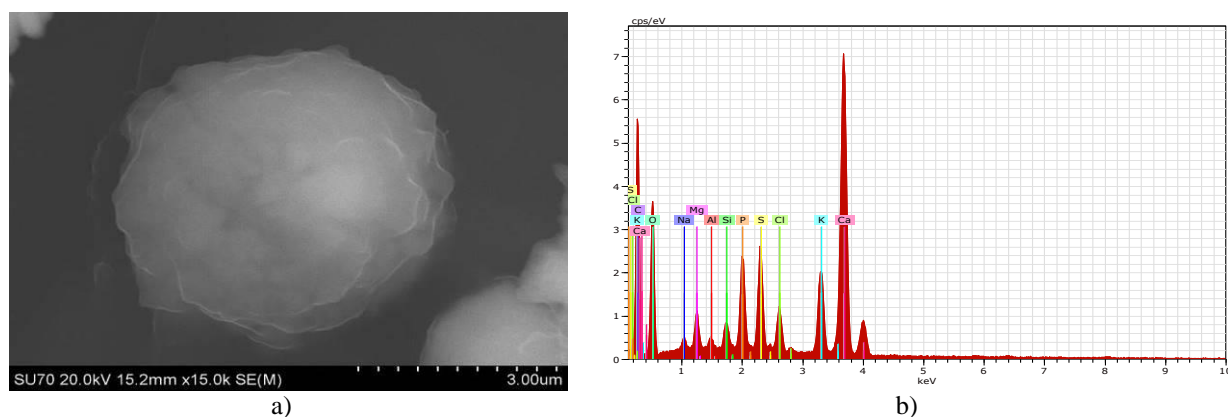


Figura 36. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS

Na Figura 37 verifica-se uma estrutura em flocos, que tal como na Figura 36, apresenta uma composição contendo fósforo, enxofre, potássio e cloro. É de referir que este tipo de estrutura pode melhorar as propriedades de adsorção devido à sua maior área superficial.

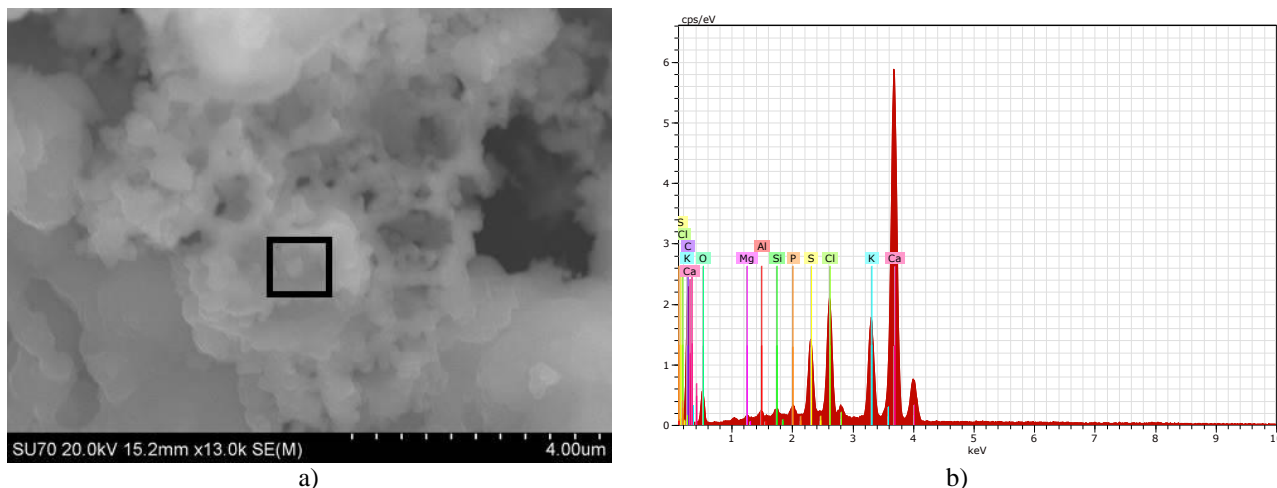


Figura 37. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

A Figura 38 mostra uma estrutura em forma de bola, sendo no entanto distinta da estrutura presente na Figura 36. É possível verificar uma bola principal, formada por inúmeras pequenas esferas. Verifica-se assim que a zona representada na micrografia é composta essencialmente por alumínio e silício (Figura 38.b)).

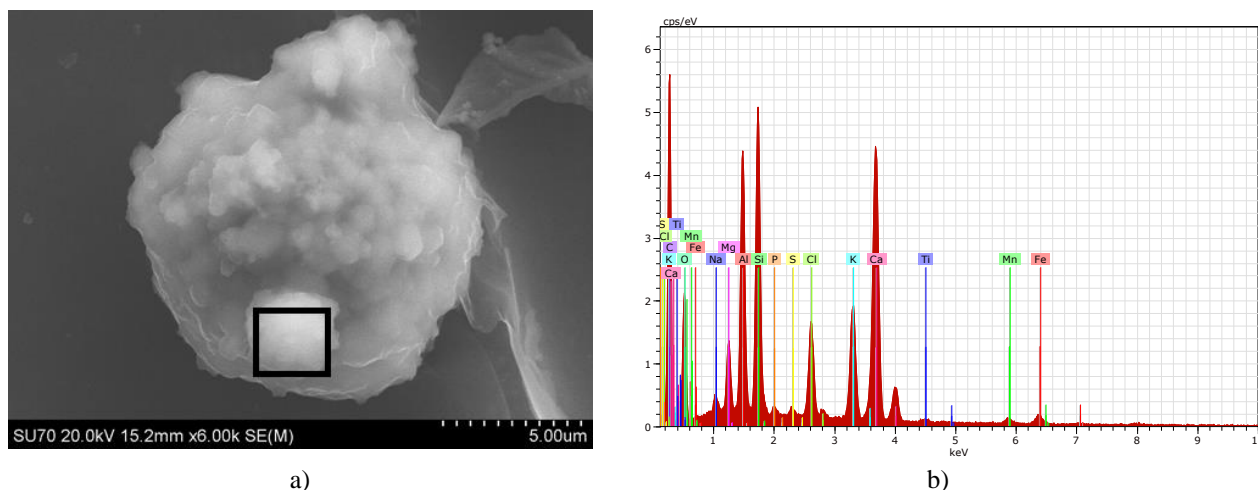


Figura 38. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

Analisando as Figuras 39 e 40, é possível verificar duas estruturas, cuja composição se apresenta completamente diferente da composição das partículas ricas em cálcio.

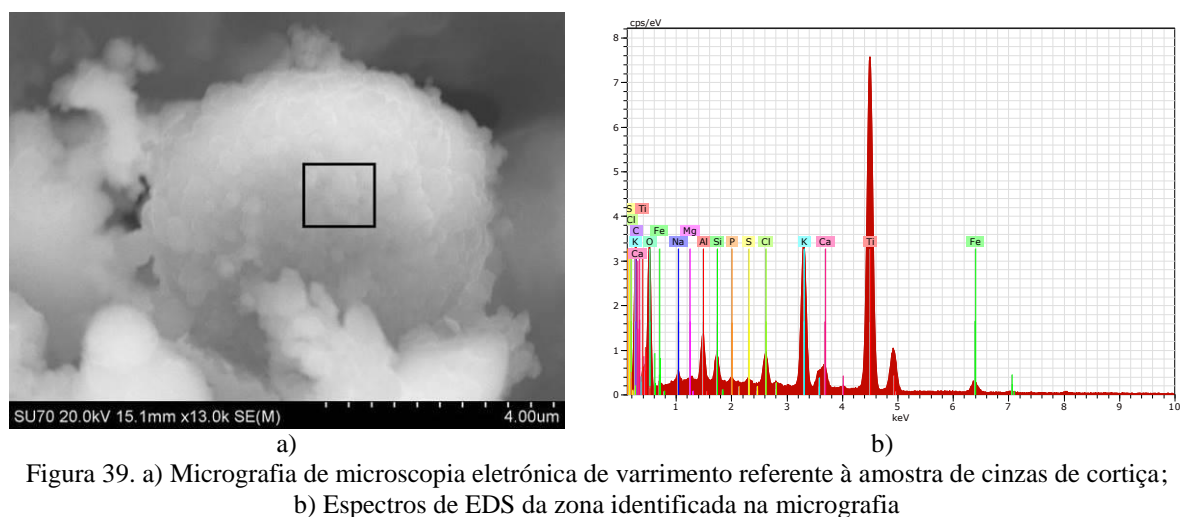


Figura 39. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

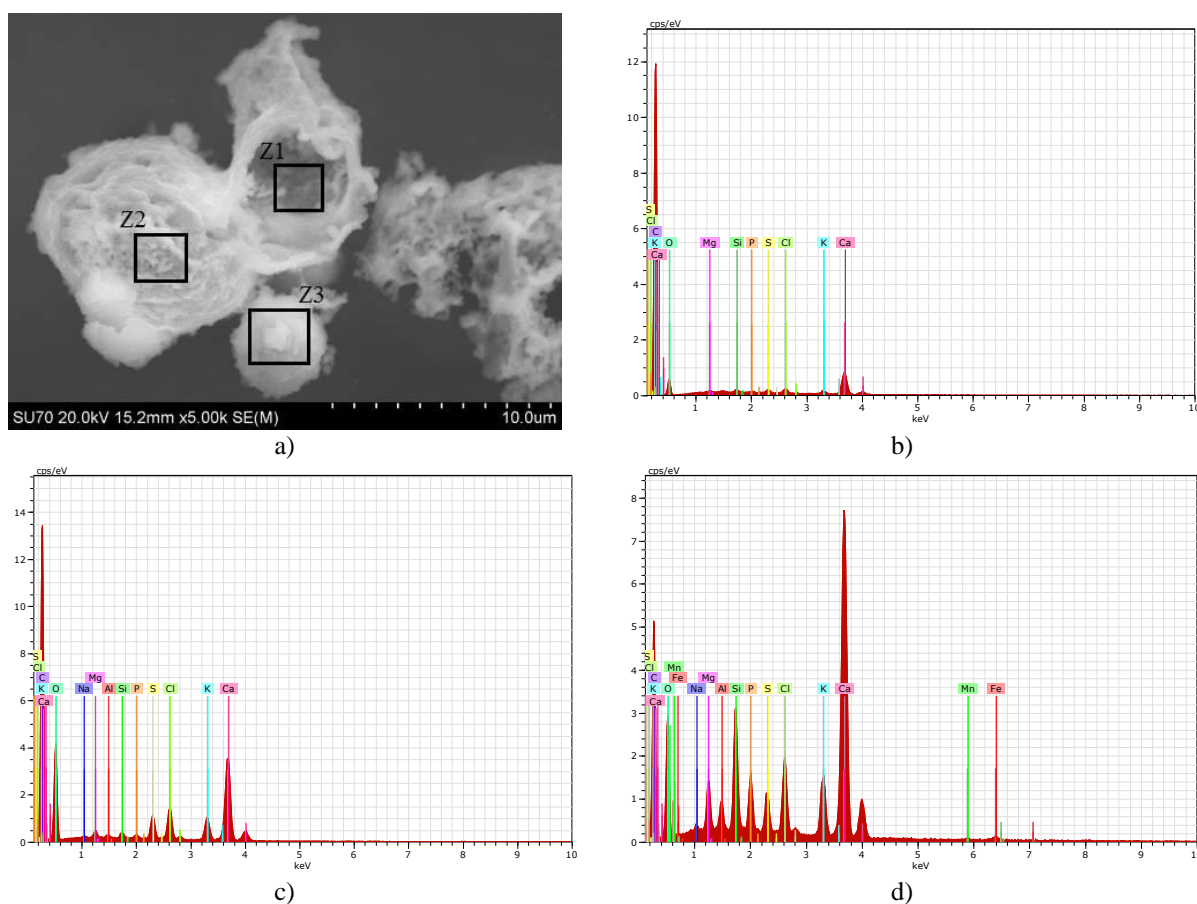


Figura 40. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra de cinzas de cortiça; b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z3 identificada na micrografia

A estrutura em bola de cor branca, presente na Figura 39, revela-se rica em titânio, apresentando pequenas quantidades de potássio e cloro. Por sua vez, a Figura 40 é um exemplo distinto de um material orgânico, apresentando menores quantidades de cálcio e poucos outros minerais. É também possível verificar a existência de uma bola de calcite ligada à estrutura.

7.2. Procedimentos experimentais no estado fresco

7.2.1. Determinação da percentagem de água de amassadura

Para que fosse alcançada a trabalhabilidade pretendida, durante o processo de amassadura a quantidade de água foi sendo ajustada. Na Tabela 6 encontram-se representadas as formulações efetuadas, com as respetivas percentagens de água de amassadura.

Tabela 6. Formulações efetuadas, com respetivas percentagens de água de amassadura

Argamassa	Ligante	Água de amassadura (%)
1	Cal Hidráulica Natural NHL 3,5	15,33
2	Cal Hidráulica Natural NHL 3,5 + Cal Aérea CL 90	17,00
3	Cimento Natural Prompt Vicat	21,21
4	Cimento Natural Prompt Vicat	17,67
5	Cimento Natural Prompt Vicat	15,00
6	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	16,67
7	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	16,67
8	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	15,33
9	Cimento Natural Prompt Vicat + Cal Aérea CL 90	16,33
10	Cimento Portland CEM I 42,5R	12,67
11	Cimento Portland CEM I 42,5R + Cal Aérea CL 90	14,00
12	Cimento Natural Marfil	35,67
13	Cimento Natural Marfil	20,00
14	Cimento Natural Marfil	22,67
15	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	17,50
16	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	25,00
17	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	19,67
18	Cimento Natural Marfil + Cal Aérea CL 90	17,33
19	Cimento Natural Tigre	24,17
20	Cimento Natural Tigre	20,00
21	Cimento Natural Tigre	18,00
22	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	20,17
23	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	19,33
24	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	16,67
25	Cimento Natural Tigre + Cal Aérea CL 90	17,00
26	Cimento Natural Prompt Vicat + Cortiça (10%)	15,67
27	Cimento Natural Marfil + Cortiça (10%)	19,33
28	Cimento Natural Tigre + Cortiça (10%)	17,00
12.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	22,67
13.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	16,83
14.R.0,5	Cimento Natural Marfil + Retardador (0,5%)	16,00

19.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	21,00
20.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	17,67
21.R.0,5	Cimento Natural Tigre + Retardador (0,5%)	16,33

Analisando a Tabela 6 é possível verificar que a percentagem de água de amassadura se encontra na ordem dos 12 a 36%, relativamente ao peso total dos sólidos.

Verifica-se também que maiores percentagens de cimento no traço das argamassas implicam a incorporação de maiores percentagens de água de amassadura. Na Tabela 6 verifica-se que para o mesmo cimento natural, ao diminuir a relação ligante/agregado, a percentagem de água de amassadura também diminui. Esta condição pode ser verificada nas argamassas de Cimento Prompt Vicat (3, 4 e 5) e nas argamassas de Cimento Natural Tigre (19, 20 e 21).

Por sua vez, nas argamassas de Cimento Natural Marfil (12, 13 e 14) esta condição não se verifica. Nas argamassas em questão verificou-se um endurecimento bastante rápido, motivo pelo qual foram necessárias maiores quantidades de água para atingir argamassas com uma boa trabalhabilidade. Assim, devido a dificuldades de amassadura das argamassas 12 e 14, foi adicionada nessas argamassas uma percentagem de água superior à necessária, sendo importante referir que este excesso de água possivelmente influenciará os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Relativamente às argamassas bastardas, com o aumento do teor de cal nas argamassas, é necessária uma maior quantidade de água de amassadura para obter a mesma consistência por espalhamento.

Nas argamassas em que foram adicionadas cinzas de cortiça, a percentagem de água de amassadura foi aproximadamente igual à utilizada nas argamassas correspondentes sem adição de cortiça. No entanto, após a moldagem dos provetes ocorreu alguma exsudação, fenómeno que revelou uma percentagem de água de amassadura superior à necessária. Este comportamento revela que com a adição de cortiça a quantidade de água pode ser reduzida, apresentando assim um efeito semelhante ao de um retardador de presa.

Por último, nas argamassas em que foi utilizado retardador de presa, a percentagem de água de amassadura revelou-se inferior à utilizada nas argamassas correspondentes sem adição de retardador, tal como esperado.

7.3. Procedimentos experimentais no estado endurecido

7.3.1. Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX)

Para obter uma análise mineralógica das argamassas em estudo, foram realizados ensaios de difração de raios-X.

Esta análise foi realizada em amostras de todas as argamassas e em diferentes tempos de cura, sendo assim possível avaliar, em termos de proporção, a formação e o desenvolvimento dos diferentes compostos mineralógicos.

Nas Figuras 41 e 42 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada em argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2).

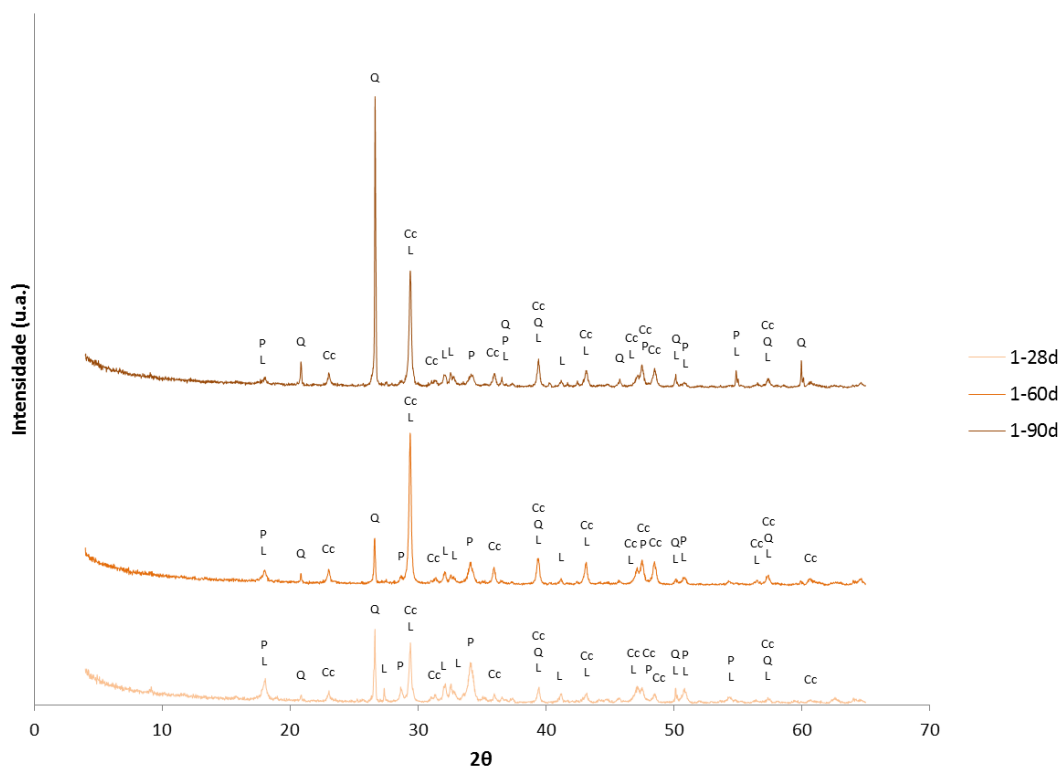


Figura 41. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 1
Q – Quartzo P – Portlandite L – Larnite Cc – Calcite

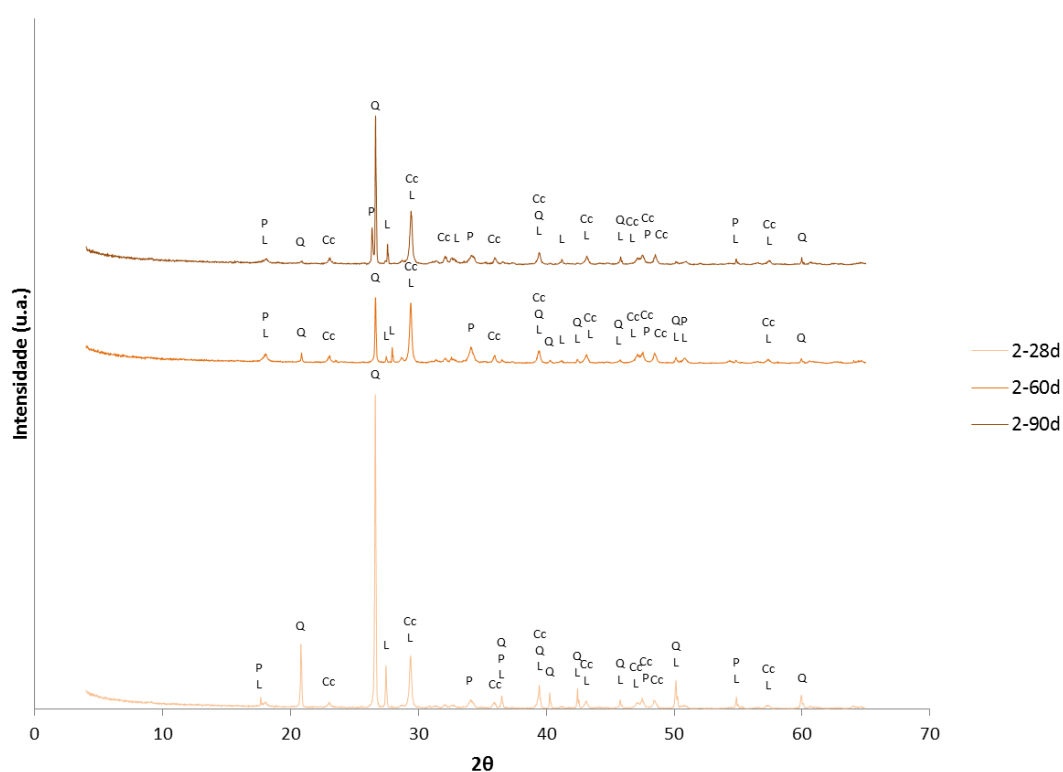


Figura 42. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 2
Q – Quartzo P – Portlandite L – Larnite Cc – Calcite

Na análise mineralógica realizada nas argamassas 1 e 2, verifica-se uma composição mineralógica bastante semelhante, com elevadas percentagens de calcite e quartzo. A presença de quartzo comprova a existência de agregado silicioso nas amostras.

Verificou-se também a presença de larnite, tratando-se este de um composto característico dos ligantes hidráulicos e sendo um constituinte anidro da cal hidráulica natural. Quando hidratado este mineral produz silicatos de cálcio hidratados e Portlandite, também existente nas argamassas 1 e 2.

Nas Figuras 43 e 44 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada em argamassas de Cimento Portland (argamassas 10 e 11).

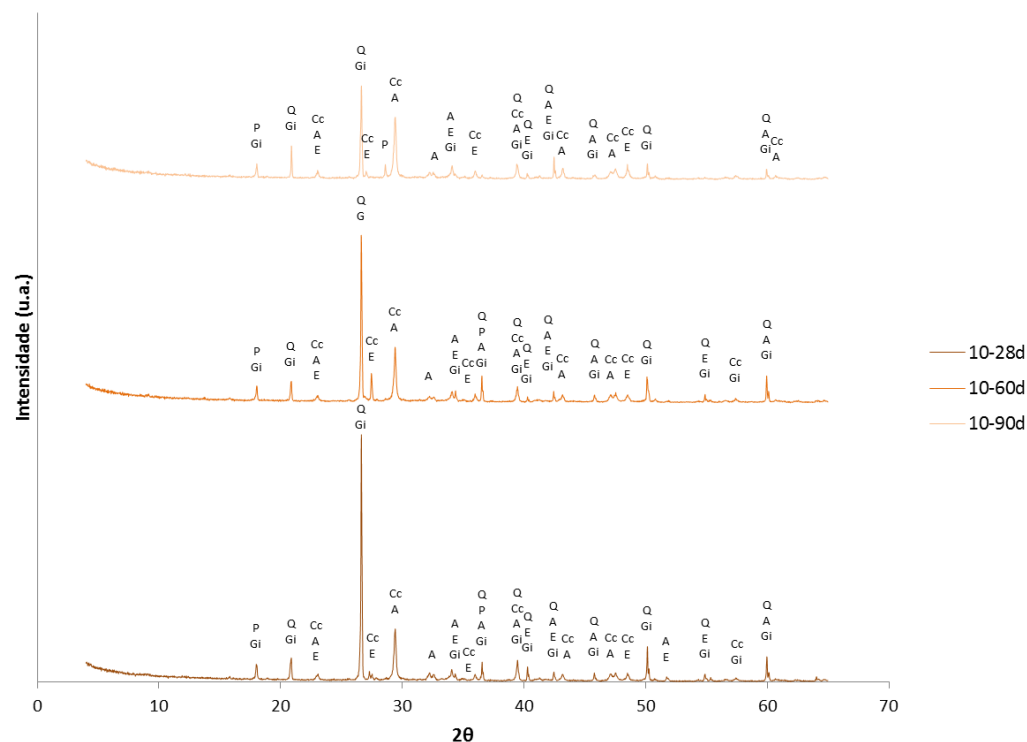


Figura 43. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 10
P – Portlandite Gi – Gismondine Q – Quartz Cc – Calcite A – Alite E – Etringite

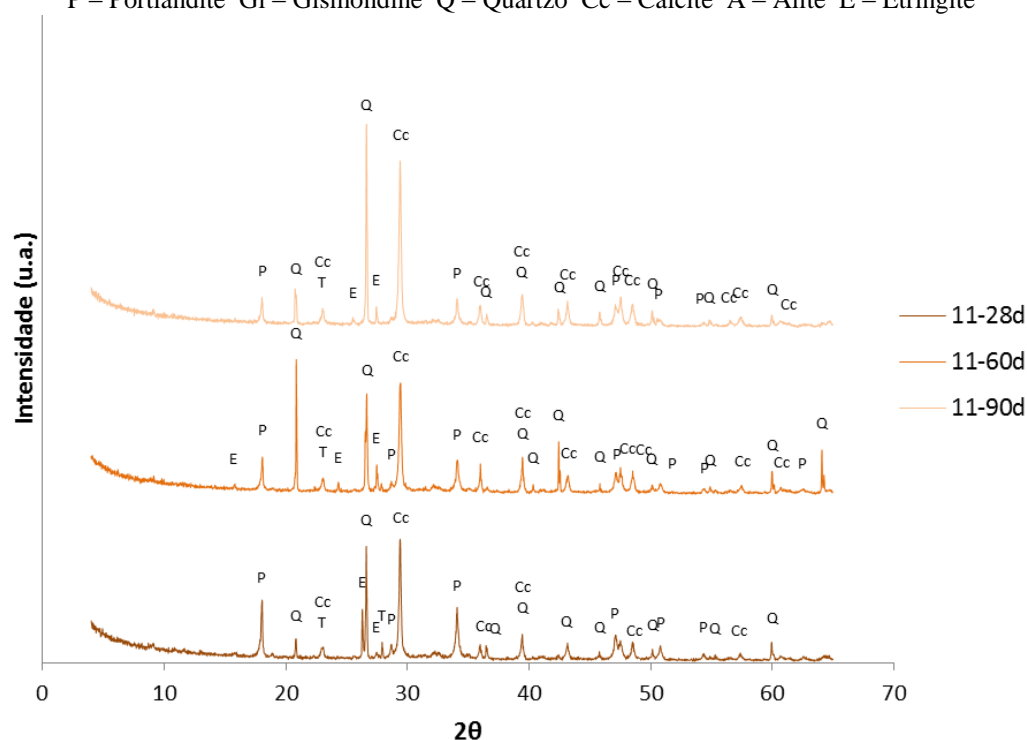


Figura 44. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 11
P – Portlandite Q – Quartz Cc – Calcite T – Ternardite E – Etringite

Na análise mineralógica às amostras das argamassas 10 e 11, verifica-se em ambas a presença de calcite e quartzo como componentes mais abundantes, comprovando o quartzo a existência de agregado silicioso nas amostras. Verificou-se também uma elevada percentagem de Portlandite, sendo esta um dos principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland.

Na argamassa 10 é também possível verificar grandes picos de componentes com elevada ordem cimentícia, sendo eles a alite e a etringite, apresentando-se estes minerais nos produtos principais da hidratação do cimento, os silicatos de cálcio hidratados. Sendo a alite formada a altas temperaturas, é um dos principais compostos dos cimentos. Por sua vez, devido à alta relação sulfato/aluminato, a etringite é geralmente o primeiro produto a cristalizar, contribuindo para o endurecimento, presa e resistência mecânica inicial do cimento. A Figura 43 mostra que esta argamassa é também formada por gismondine, um sílico-aluminato de cálcio hidratado. Na argamassa 11, além de etringite, é também possível verificar a presença de uma pequena percentagem de ternardite, correspondente à cristalização de sulfato de sódio na forma anidra.

Nas Figuras 45, 46 e 47 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada em argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Prompt Vicat (argamassas 3, 4 e 5).

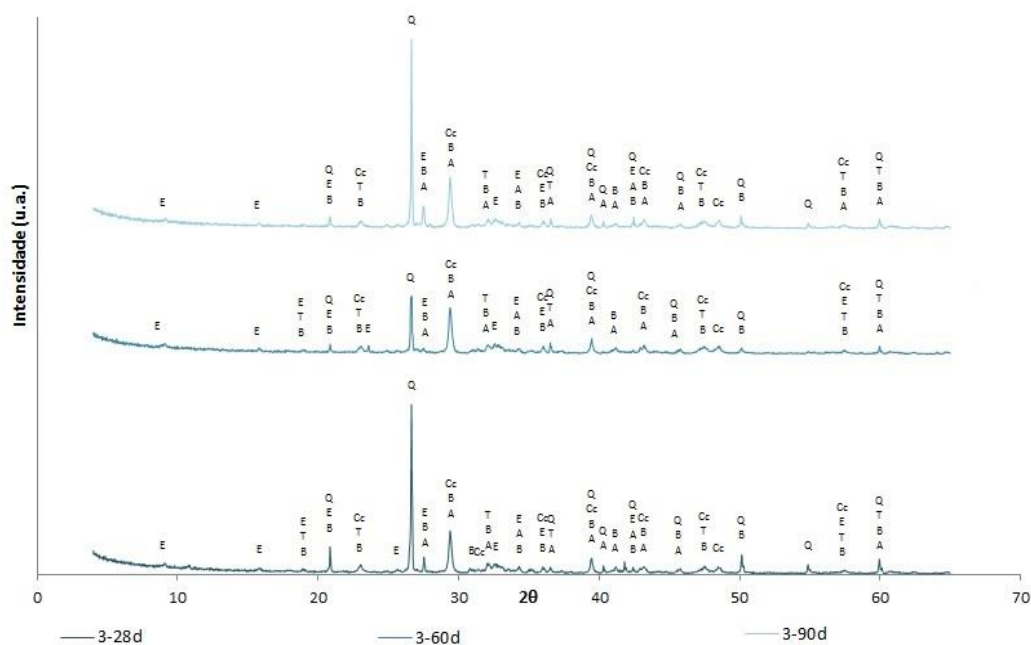


Figura 45. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 3
Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite A – Alite T – Ternardite E – Etringite

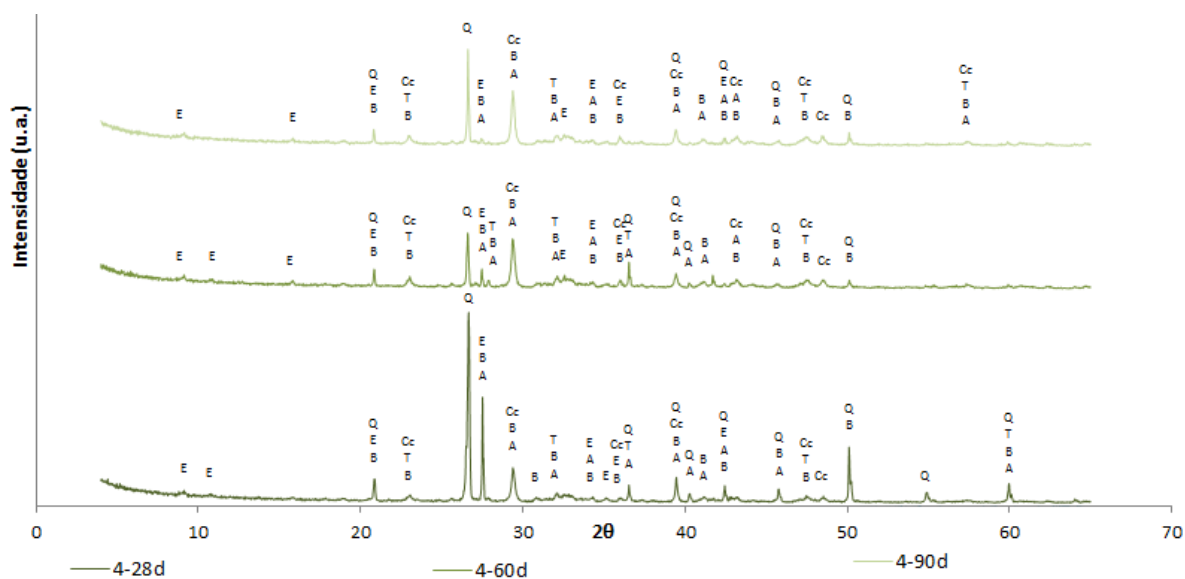


Figura 46. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 4
Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite A – Alite T – Ternardite E – Etringite

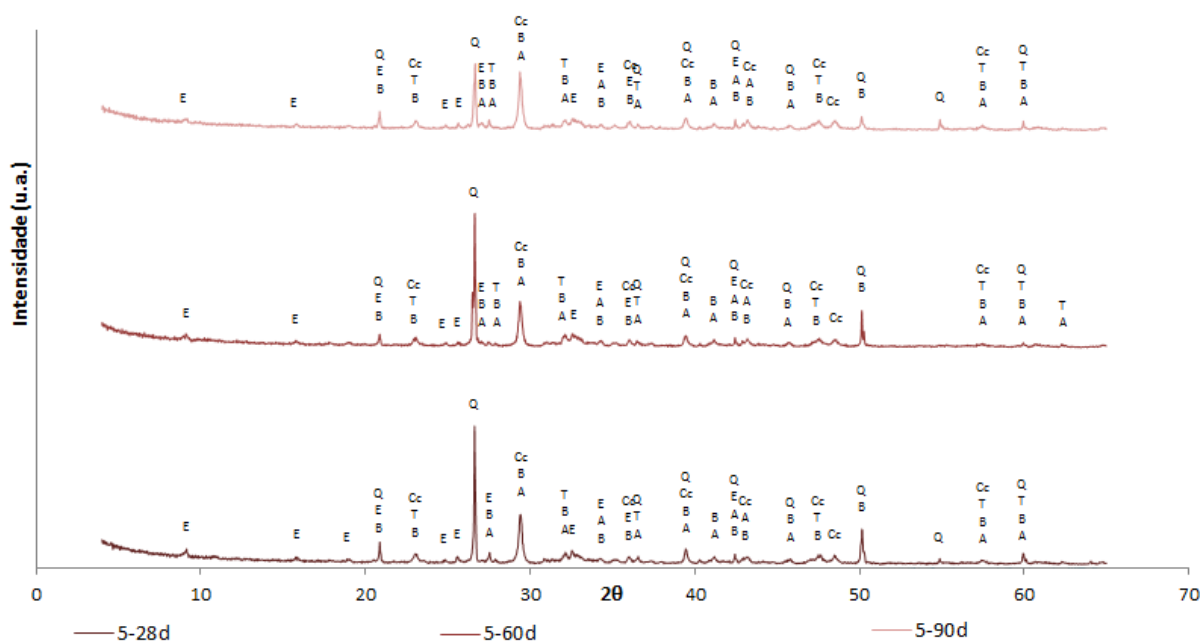


Figura 47. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 5
Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite A – Alite T – Ternardite E – Etringite

Considerando os resultados representados nas figuras anteriores é possível verificar que as três amostras apresentam uma composição mineralógica semelhante, apresentando os mesmos minerais nas suas composições. Os minerais detetados foram quartzo, calcite, alite, belite, etringite e ternardite. O facto de a composição mineralógica ser a mesma para as três argamassas deve-se a diferirem apenas nas formulações.

Analisando os resultados da análise mineralógica realizada às amostras das argamassas 3, 4 e 5, verificam-se grandes teores em calcite e quartzo, sendo estes os componentes mais abundantes na composição destas argamassas. Analogamente às restantes argamassas analisadas, a existência de quartzo em elevada percentagem verifica a existência de areia siliciosa de rio utilizada como agregado.

Verificam-se grandes picos de belite e alite, constituintes cimentícios, resultantes da ação das altas temperaturas. Estes silicatos de cálcio são os principais responsáveis pela ação ligante e pelo desenvolvimento da resistência mecânica do cimento. A belite, nome comum dado à larnite quando esta se encontra associada a cimentos, trata-se de um silicato bicálcico, característico dos ligantes hidráulicos, que comprova assim a hidraulicidade do ligante utilizado. Este mineral confere baixas resistências iniciais que aumentam a partir dos 28 dias. Por sua vez, a alite é o componente que confere maiores resistências iniciais, e sendo metaestável transforma-se em belite se o arrefecimento ocorrer devagar.

É também possível verificar a presença de pequenas percentagens de etringite e ternardite. A etringite, componente com elevada ordem cimentícia, resulta da hidratação do cimento, sendo geralmente o primeiro produto a cristalizar, contribuindo para o endurecimento, presa e resistência mecânica inicial do cimento. A ternardite corresponde à cristalização de sulfato de sódio na forma anidra.

Nas Figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada em argamassas bastardas de Cimento Natural Prompt Vicat e cal aérea (argamassas 6, 7, 8 e 9).

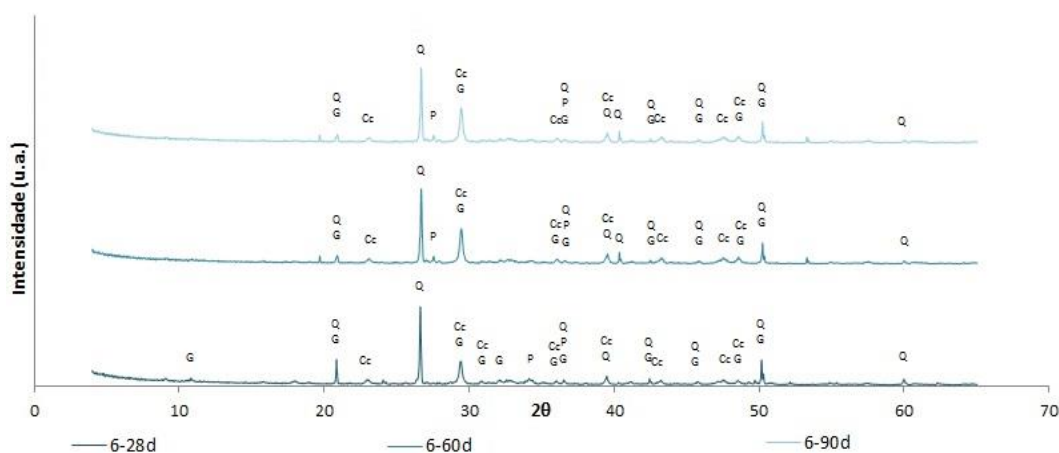


Figura 48. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 6
Q – Quartzo Cc – Calcite P – Portlandite G – Gesso

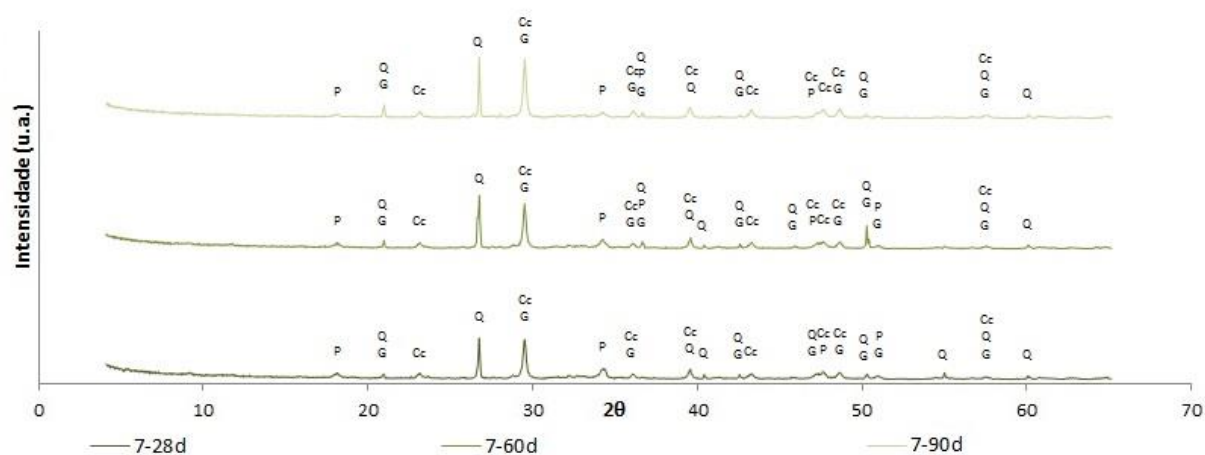


Figura 49. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 7
Q – Quartzo Cc – Calcite P – Portlandite G – Gesso

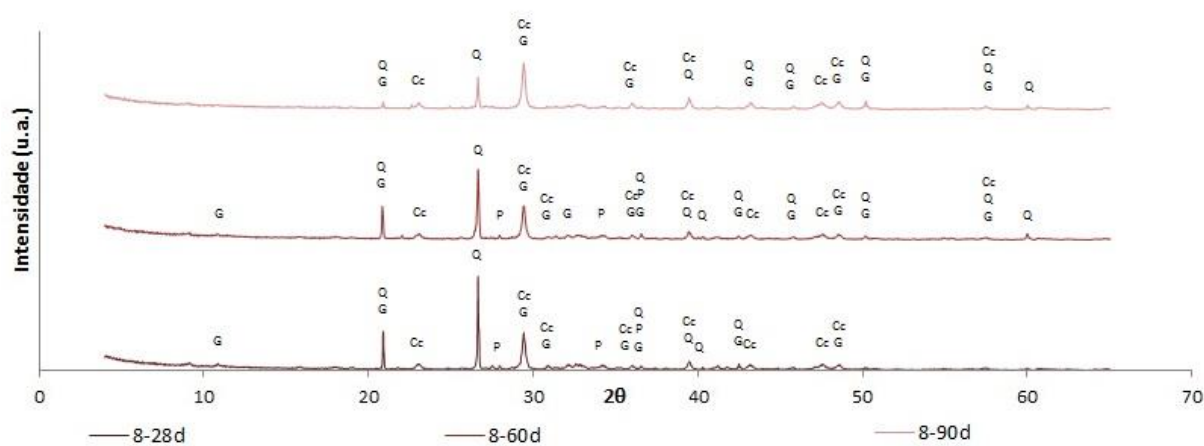


Figura 50. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 8
Q – Quartzo Cc – Calcite P – Portlandite G – Gesso

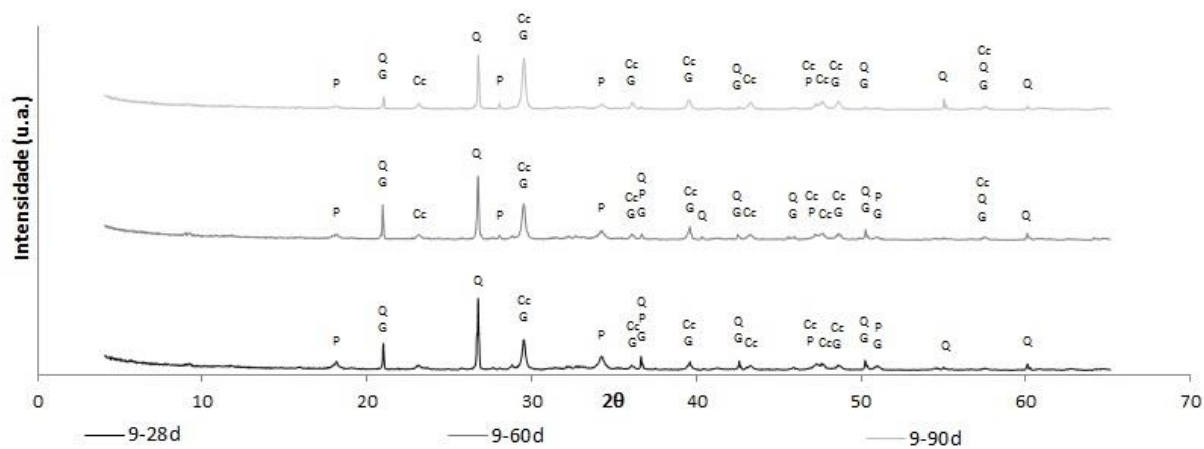


Figura 51. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 9
Q – Quartzo Cc – Calcite P – Portlandite G – Gesso

Considerando as Figuras 48, 49, 50 e 51, é possível verificar que as quatro amostras apresentam uma composição mineralógica bastante semelhante, apresentando nas suas composições calcite, quartzo, portlandite e gesso. São também verificadas pequenas percentagens de silicato de cálcio hidratado. O facto de a composição mineralógica ser a mesma para as quatro argamassas deve-se a ambas serem compostas por Cimento Natural Prompt Vicat e cal aérea, diferindo apenas nos respetivos traços.

Tal como o esperado, os resultados da análise mineralógica revelam que a calcite e o quartzo são os componentes com maiores percentagens na composição destas argamassas.

Como referido, na composição destas argamassas também se verifica a existência de portlandite, maioritariamente proveniente da composição da cal aérea, mas possivelmente também obtida da hidratação da belite presente na composição do cimento natural. No entanto é de salientar que a portlandite também vai sendo consumida na reação de carbonatação que ocorre devido à introdução de cal aérea nestas argamassas. Este facto pode ser comprovado, analisando por exemplo as Figuras 50 e 51, correspondentes às análises mineralógicas efetuadas nas argamassas 8 e 9. Estas argamassas apresentam a mesma relação ligante/agregado, apresentando a argamassa 9 maior teor em cal aérea que a argamassa 8. Pode assim ser explicado o facto de o pico relativo à portlandite aos 28 dias ser mais acentuado no caso da argamassa 9 do que no caso da argamassa 8. No entanto, nos dois casos o pico correspondente à portlandite vai diminuindo ao longo do tempo, comprovando assim o consumo de portlandite durante a carbonatação.

É também possível verificar a presença de pequenas percentagens de gesso e silicato de cálcio hidratado. A presença de gesso na constituição destas argamassas verifica o resultado de FRX da amostra de Cimento Natural Prompt Vicat, apresentando esta teores de óxido sulfúrico (SO_3). Por sua vez, o silicato de cálcio hidratado é proveniente da hidratação da belite e da alite, componentes deste cimento.

É importante salientar que a ausência de alite e belite na composição destas quatro argamassas, comprova a completa hidratação do cimento.

A análise de difração de raios-X foi também efetuada com amostras de todas as argamassas de Cimento Natural Marfil e Cimento Natural Rápido Tigre. Os resultados obtidos para as amostras de argamassas de Cimento Natural Marfil revelaram-se bastante semelhantes aos

resultados obtidos para o Cimento Natural Prompt Vicat, apresentando nas suas composições os mesmos minerais, em percentagens semelhantes.

No entanto, os resultados obtidos para as amostras de argamassas de Cimento Natural Tigre comprovam mais uma vez que este cimento natural é de facto diferente, apresentando teores de cálcio que se revelam maioritariamente sob a forma de calcite. É também possível verificar menores quantidades de gesso nas argamassas deste cimento, comprovando os resultados de FRX da amostra de Cimento Natural Tigre que, comparativamente aos restantes cimentos, revelaram teores mais baixos de óxido sulfúrico (SO_3).

Desta forma, os resultados obtidos nos ensaios de DRX em amostras de argamassas de Cimento Natural Marfil e em amostras argamassas de Cimento Natural Rápido Tigre encontram-se nos Anexos I e II.

Nas Figuras 52, 53 e 54 apresentam-se os resultados da análise mineralógica realizada em argamassas com introdução de cinzas de cortiça (argamassas 26, 27 e 28).

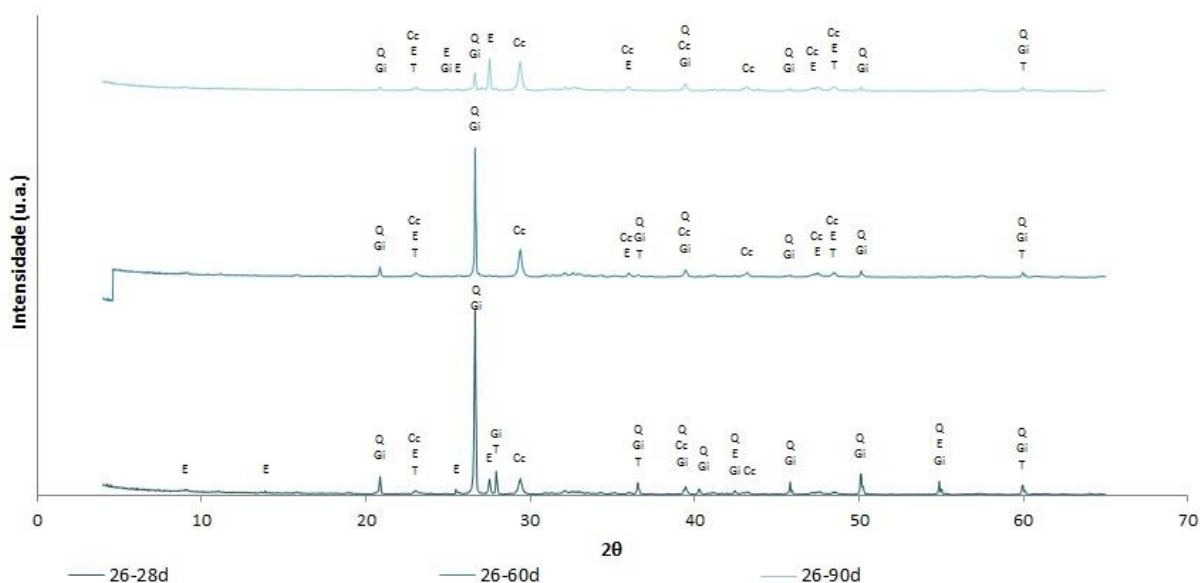


Figura 52. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 26
Q – Quartzo Cc – Calcite Gi – Gismondine E – Etringite T – Ternardite

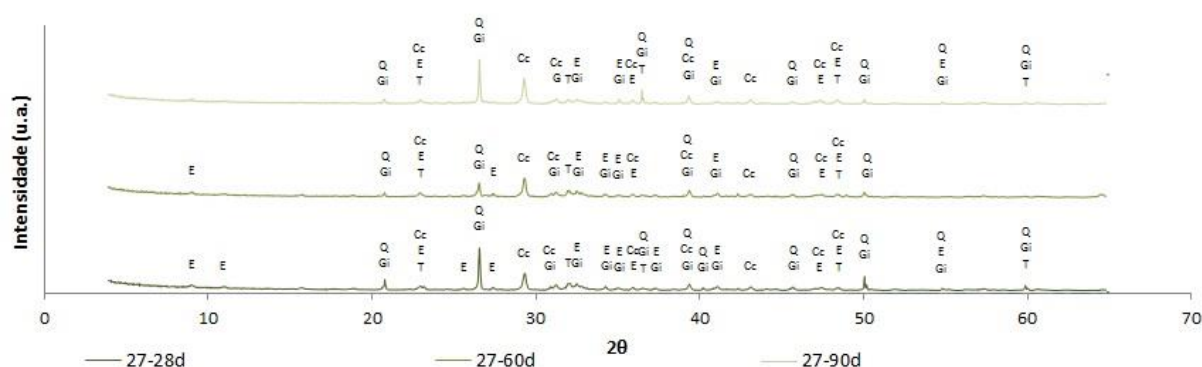


Figura 53. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 27
Q – Quartzo Cc – Calcite Gi – Gismondine E – Etringite T – Ternardite

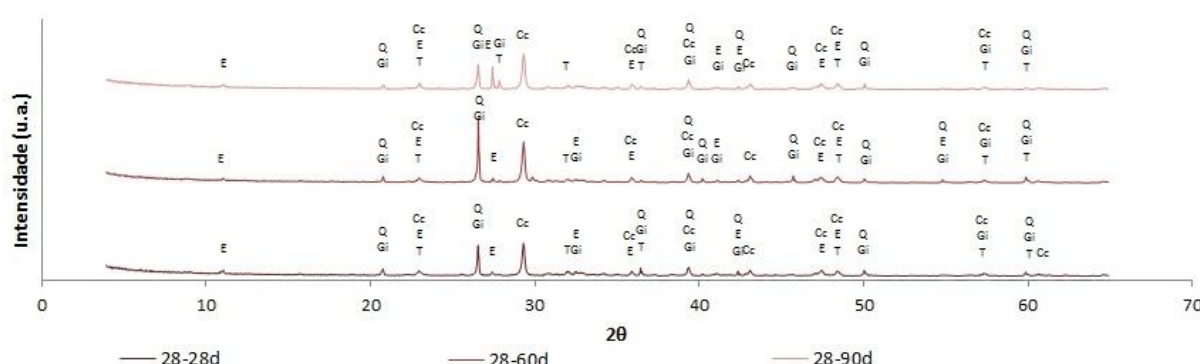


Figura 54. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 28
Q – Quartzo Cc – Calcite Gi – Gismondine E – Etringite T – Ternardite

Considerando as Figuras 52, 53 e 54 verifica-se que as três argamassas em que foram incorporadas cinzas de cortiça, apresentam uma composição mineralógica bastante semelhante. Este facto já era expectável, uma vez que os cimentos utilizados na produção das argamassas também apresentam uma composição mineralógica muito semelhante. Podem assim identificar-se compostos como a calcite, o quartzo, a gismondine e a etringite, sendo também verificadas pequenas percentagens de ternardite e silicato de cálcio hidratado.

Analogamente às restantes argamassas, os resultados da análise mineralógica revelam elevadas percentagens de calcite e quartzo. A presença de quartzo comprova a existência de agregado silicioso nas amostras.

As figuras anteriores mostram que estas argamassas são também formadas por gismondine, um sílico-aluminato de cálcio hidratado, sendo também possível verificar a presença de etringite. Este mineral é um dos principais produtos da hidratação do cimento e, sendo o primeiro produto a cristalizar, contribui para o endurecimento, presa e resistência mecânica inicial do cimento.

Por sua vez, a ternardite e o silicato de cálcio hidratado encontram-se na composição destas argamassas em pequenas percentagens. A ternardite correspondendo à cristalização de sulfato de sódio na forma anidra, enquanto o silicato de cálcio hidratado é proveniente da hidratação da belite e da alite, componentes destes cimentos.

É importante referir que a ausência de alite e belite na composição destas argamassas comprova a completa hidratação do cimento.

7.3.2. Análise microscópica por microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

De forma a aprofundar o conhecimento sobre as argamassas em estudo, optou-se por analisar a sua microestrutura, recorrendo à técnica de microscopia eletrónica de varrimento (SEM). A constituição química das argamassas foi também analisada, recorrendo à microanálise com sonda EDS.

Nas Figuras 55 a 63 apresentam-se as micrografias da superfície das amostras, com os respetivos espectros de EDS, observando-se morfologias semelhantes, com composições diversas.

De uma forma geral, as argamassas em estudo apresentam na sua composição, em diferentes proporções, cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al), enxofre (S), magnésio (Mg), ferro (Fe) e potássio (K). Esta grande variedade origina diferentes morfologias.

Na Figuras 55, 56 e 57 encontram-se os resultados obtidos para a amostra de argamassa composta por cal hidráulica natural, com traço 1:2 de ligante:agregado (argamassa 1). Nestas figuras é possível verificar uma composição baseada em cálcio, devendo-se a existência deste composto à calcite, cuja existência foi verificada por DRX.

Analisando a Figura 55.a) é possível verificar uma morfologia composta por várias partículas em forma de flocos que se encontram ligados entre si. A microanálise com sonda EDS realizada na zona indicada na Figura 55.a) revela uma composição essencialmente em cálcio, apresentando também silício e pequenas quantidades de alumínio (Figura 55.b)).

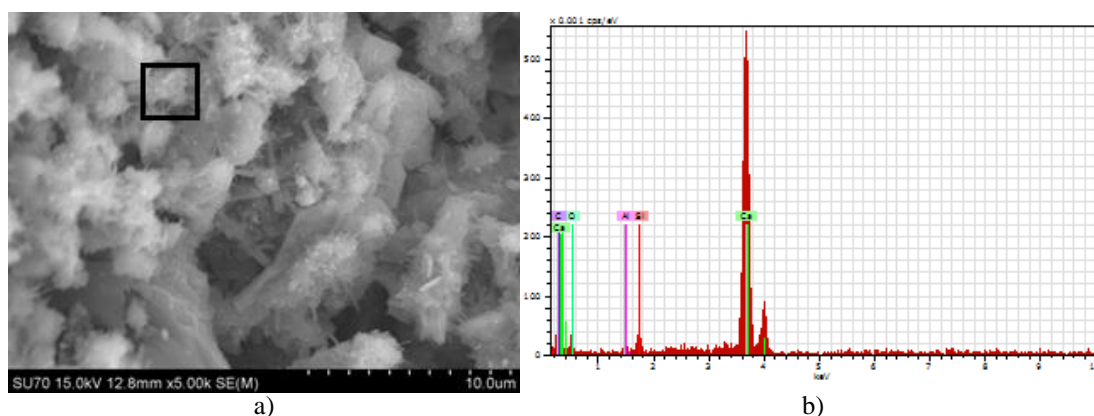


Figura 55. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 1;
b) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

Na Figura 56.a) apresentam-se partículas com morfologia semelhante à descrita anteriormente, existindo uma partícula que se destaca, devido à sua forma de garra. A microanálise foi realizada em duas zonas distintas, correspondendo a zona Z1 à estrutura em forma de garra e a zona Z2 a estruturas em forma de flocos. A zona Z1 revela ser composta essencialmente por cálcio e silício (Figura 56.b)) e a zona Z2 por cálcio, silício e alumínio (Figura 56.c)).

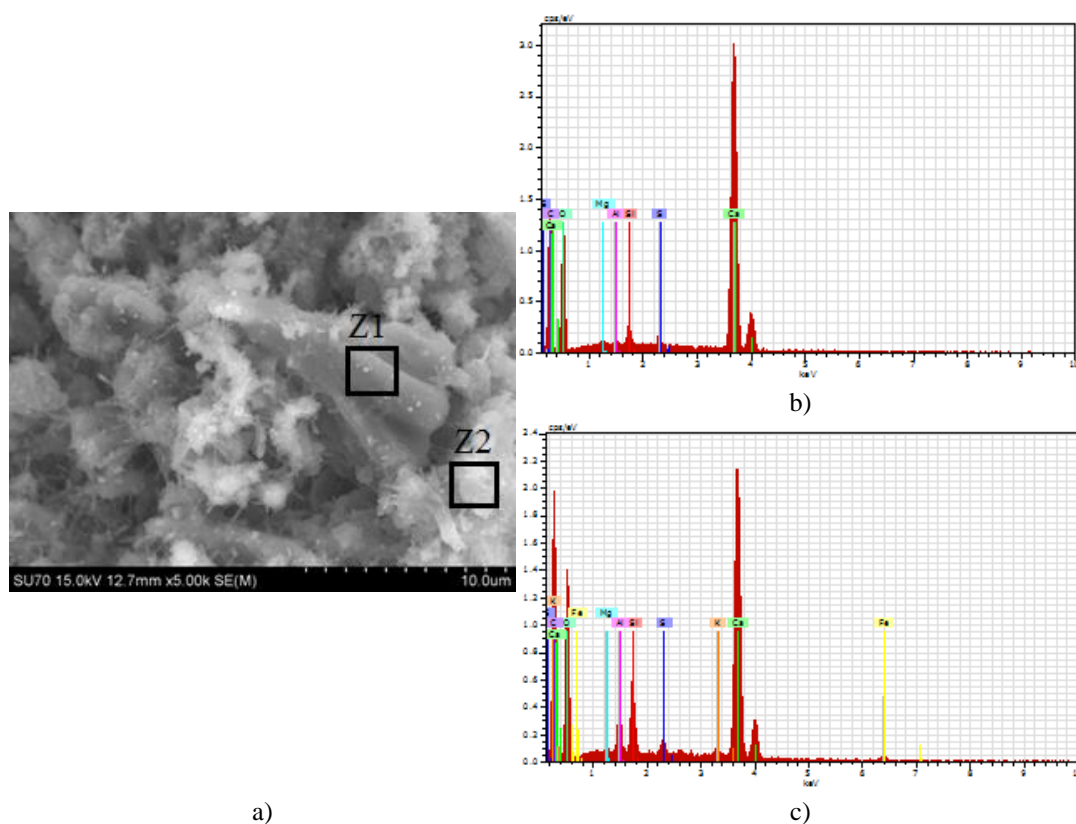


Figura 56. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 1;
b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia

Na Figura 57 apresenta-se ampliada uma zona composta por partículas em forma de flocos, observando-se pequenas partículas em forma de palitos (Figura 57.a)) associadas às partículas em forma de flocos (Figura 57.b)). Analogamente às zonas estudadas anteriormente é possível verificar partículas compostas principalmente por cálcio, identificando-se também quantidades consideráveis de silício, alumínio e magnésio, e pequenas quantidades de potássio e enxofre.

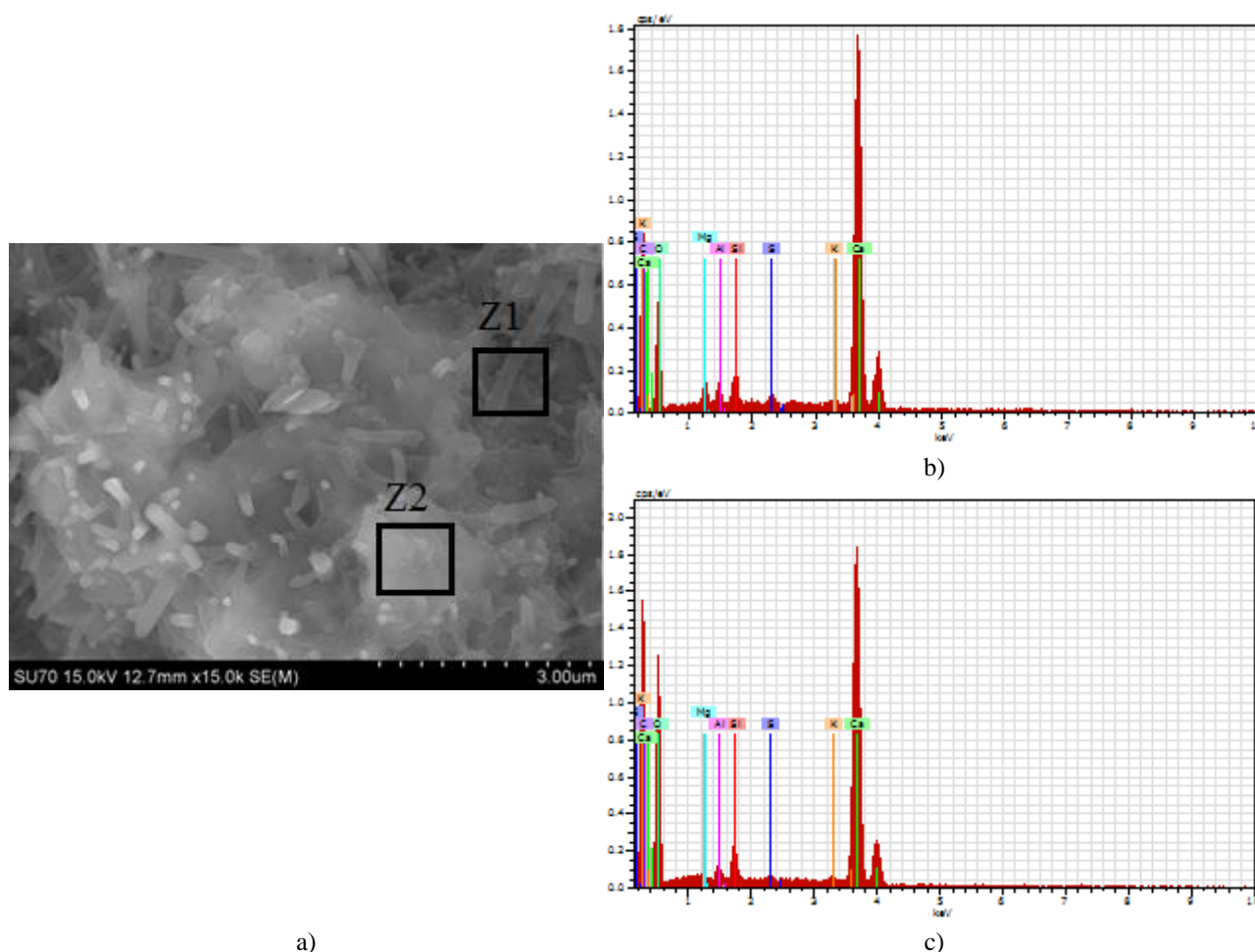


Figura 57. a) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 1; b) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; c) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia

Na Figura 58 encontram-se os resultados obtidos para a amostra de argamassa composta por cimento Portland, com traço 1:2 de ligante:agregado (argamassa 10). Nestas figuras é possível verificar uma composição baseada em silício, devendo-se a existência deste composto ao quartzo, à gismondine e à alite, cuja existência foi verificada por DRX.

Analisando a Figura 58.a) é possível verificar uma morfologia composta por várias partículas em forma de flocos. Estas partículas encontram-se ampliadas na Figura 58.b), sendo compostas por silício e pequenas quantidades de cálcio, alumínio e potássio (Figura 58.c)). Verifica-se

também a existência de uma zona com morfologia mais plana, composta essencialmente por silício (Figura 58.d)).

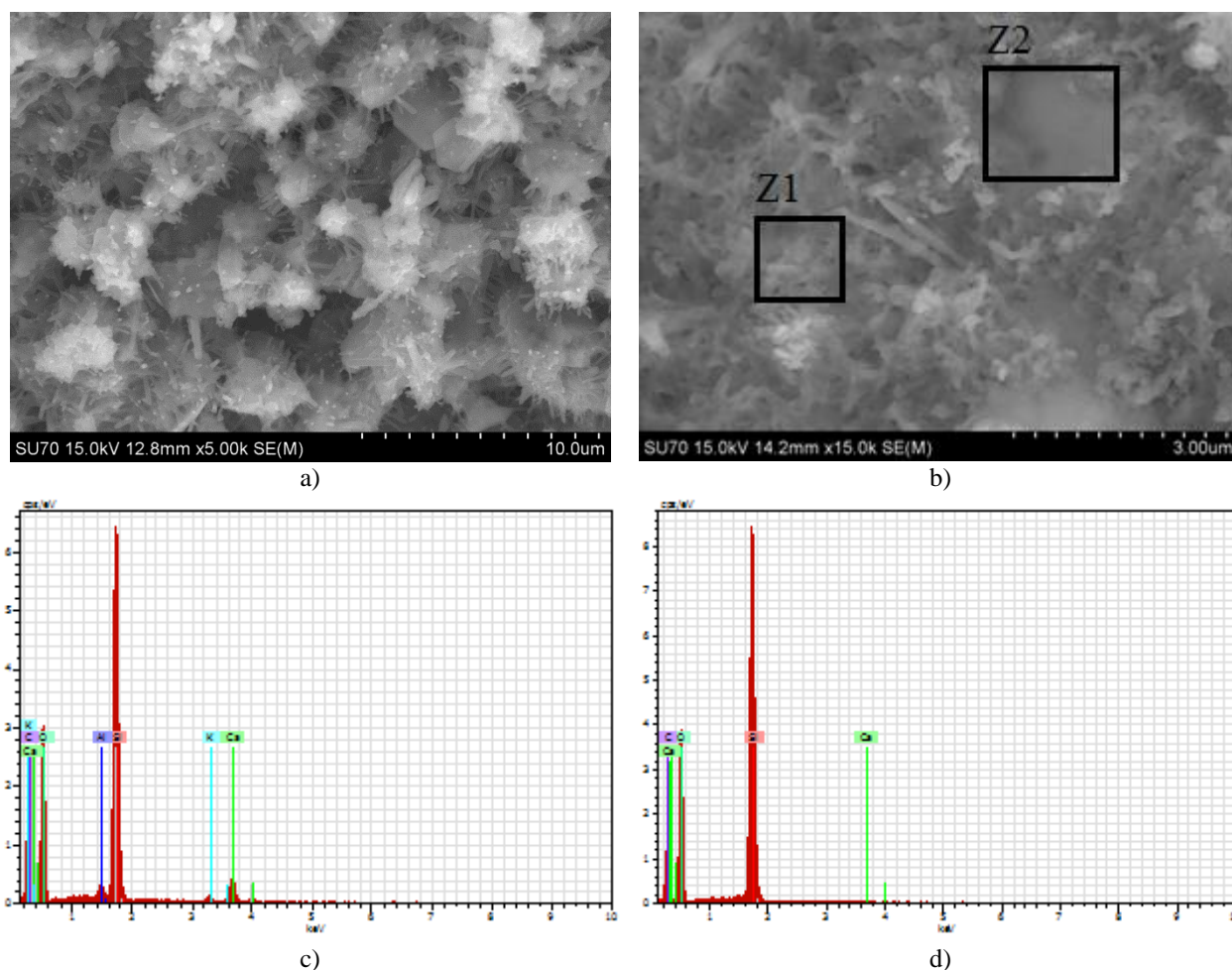


Figura 58. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 10; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia

Na Figura 59 encontram-se os resultados obtidos para a amostra de argamassa composta por Cimento Natural Prompt Vicat, com traço 1:0,5 de ligante:agregado (argamassa 3). Nesta figura é possível verificar uma composição baseada em cálcio, devendo-se a existência deste composto à calcite, à alite e à belite, cuja existência foi verificada por DRX.

Na Figura 59.a) é possível verificar uma morfologia composta por várias partículas em forma de flocos, verificando-se também partículas em forma de palitos de dimensões mais reduzidas. Na Figura 59.b) as partículas em forma de palitos são mais visíveis. Por sua vez, na Figura 59.c) é possível observar uma estrutura com morfologia bastante interessante. A estrutura em questão apresenta uma forma semelhante a um vulcão, sendo composta por várias partículas de forma filamentar. Analisando o espectro de EDS dessa estrutura (Figura 59.d)) é possível

verificar que além de apresentar cálcio na sua composição, apresenta também alumínio, silício e enxofre e pequenas quantidades de potássio e ferro.

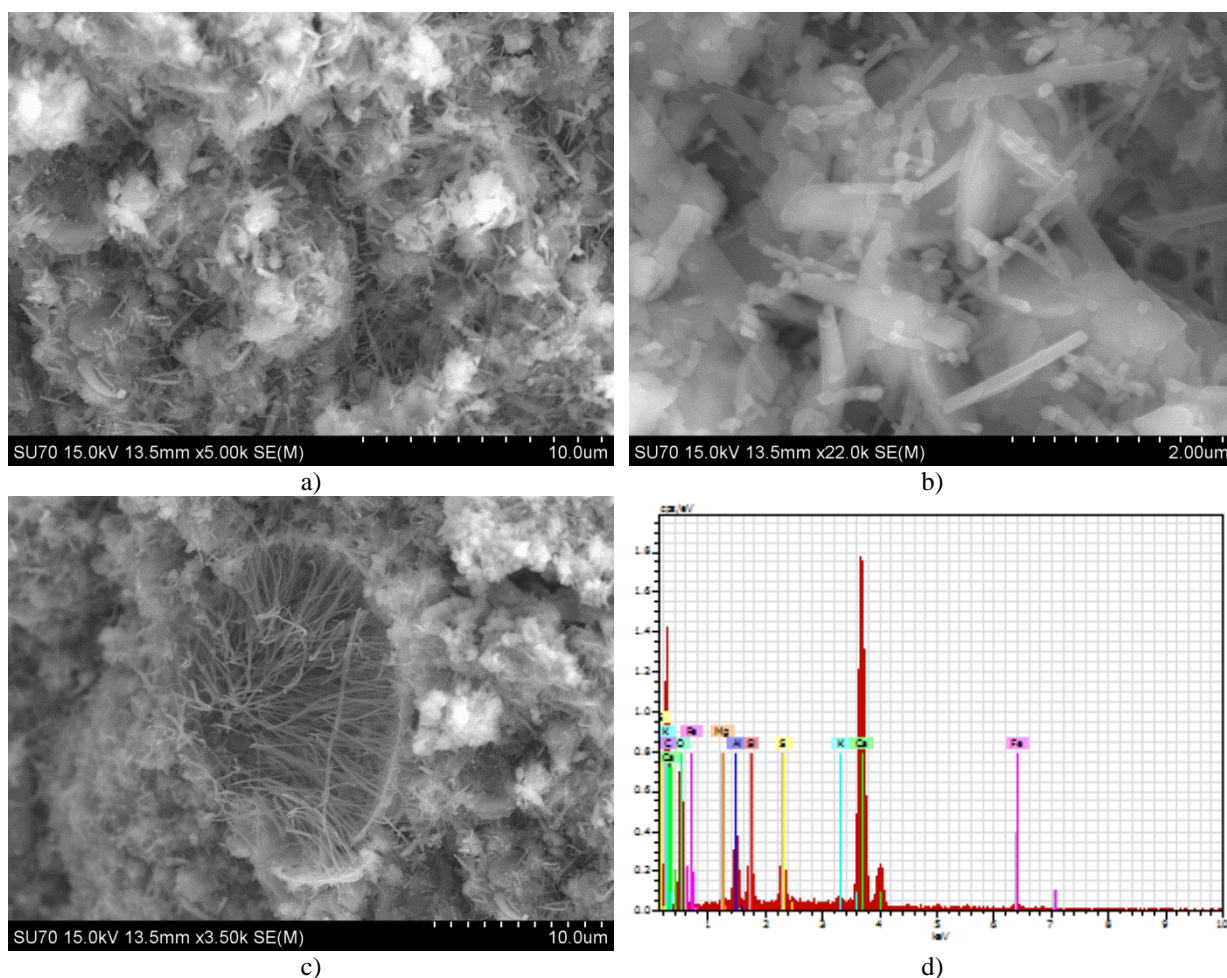


Figura 59. a), b) e c) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 3; d) Espectros de EDS

Na Figura 60 encontram-se os resultados obtidos para a amostra de argamassa composta por Cimento Natural Marfil, com traço 1:0,5 de ligante:agregado (argamassa 12). Nesta figura é possível verificar uma composição baseada em cálcio, devendo-se a existência deste composto à belite, cuja existência foi verificada por DRX.

Analisando a Figura 60.a) é possível verificar que a amostra de argamassa de Cimento Natural Marfil apresenta uma morfologia semelhante à da amostra de argamassa de Cimento Natural Vicat. Na amostra em questão verificam-se várias partículas em forma de flocos, verificando-se também partículas em forma de palitos de dimensões mais reduzidas. Estas partículas encontram-se ampliadas na Figura 60.b), onde é possível distinguir umas partículas mais arredondadas e outras mais alongadas. A Figura 60.c) corresponde ao espectro de EDS da zona

identificada, revelando uma morfologia rica em cálcio, silício e alumínio, sendo este último proveniente da etringite.

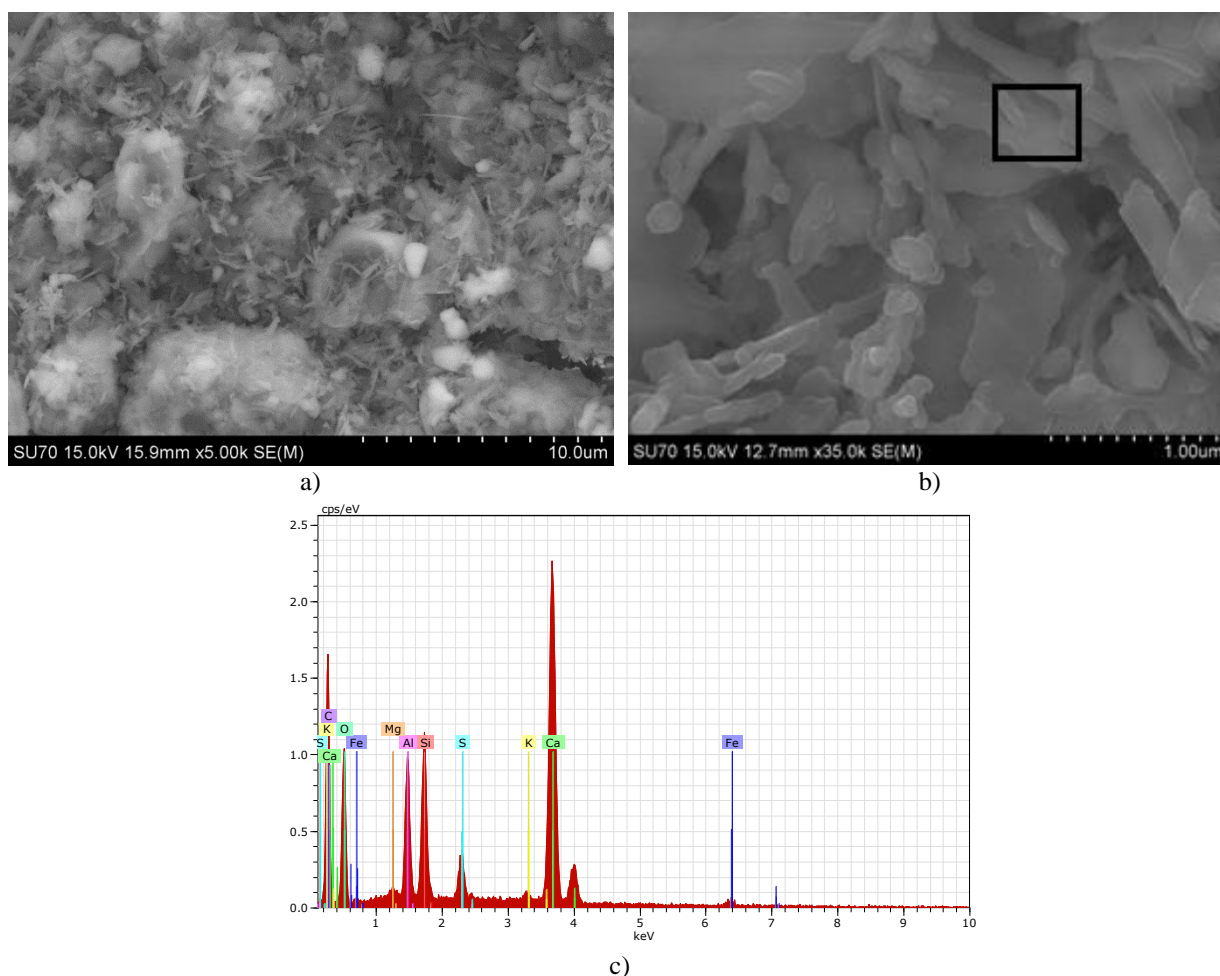


Figura 60. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 12;
c) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

Nas Figuras 61 e 62 encontram-se os resultados obtidos para a amostra de argamassa composta por Cimento Natural Rápido Tigre, com traço 1:0,5 de ligante:agregado (argamassa 19). Nestas figuras verifica-se uma composição rica em cálcio, devida essencialmente à calcite, cuja existência foi verificada por DRX. Verificam-se também quantidades consideráveis de silício (proveniente do quartzo e da belite) e de alumínio (proveniente da etringite).

Analisando as Figuras 61.a) e 62.a) verifica-se que a amostra de argamassa de Cimento Natural Tigre apresenta uma morfologia semelhante à das amostras dos restantes cimentos naturais, revelando no entanto uma microestrutura mais densa, com uma maior concentração de partículas. Verificam-se assim partículas em forma de flocos e outras em forma de palitos de dimensões mais reduzidas, havendo também estruturas mais planas como mostra a Figura 61.b) e outras mais arredondadas como mostra a Figura 62.b).

Analisando a Figura 61.b) é possível verificar duas morfologias distintas, estando essas zonas identificadas e tendo sido realizada microanálise com sonda EDS nessas mesmas zonas. A zona Z1, correspondente a uma estrutura com morfologia mais plana, revela uma composição essencialmente em cálcio, apresentando também silício, potássio, alumínio, ferro, magnésio e enxofre (Figura 61.c)). A zona Z2 revela uma composição semelhante, mas com maiores quantidades de silício e alumínio (Figura 61.d)).

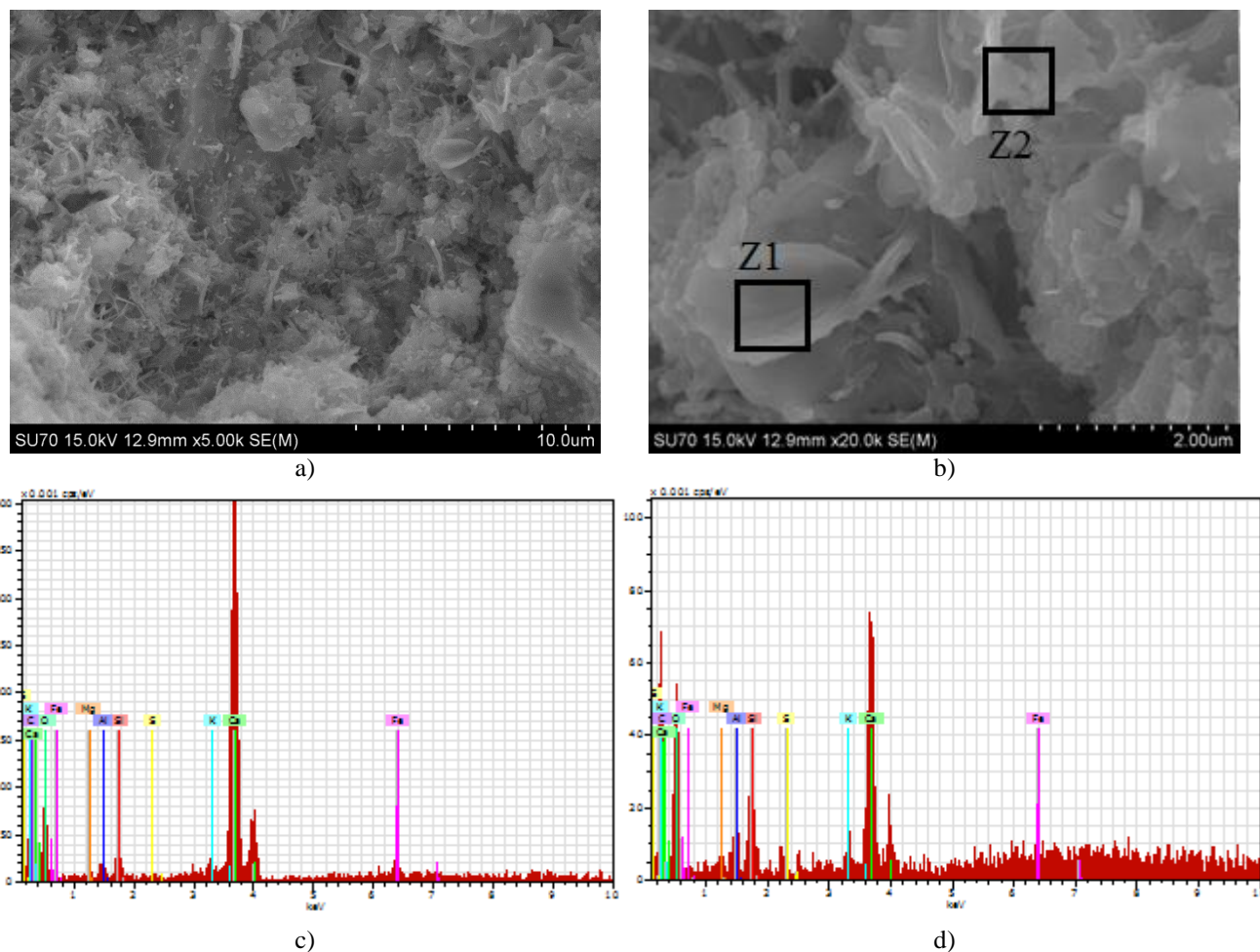


Figura 61. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 19; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia

Analisando a Figura 62.b) é possível verificar uma partícula de morfologia arredondada (zona Z1), rodeada por várias outras partículas com aspeto floreado (zona Z2). A microanálise com sonda EDS realizada na zona arredondada (Figura 62.c)) revela uma composição essencialmente em cálcio, silício e alumínio, apresentando também ferro, magnésio, potássio e enxofre. Por sua vez, a zona correspondente à morfologia mais floreada (Figura 62.d)), apresenta uma composição semelhante, mas com menores quantidades de silício e alumínio.

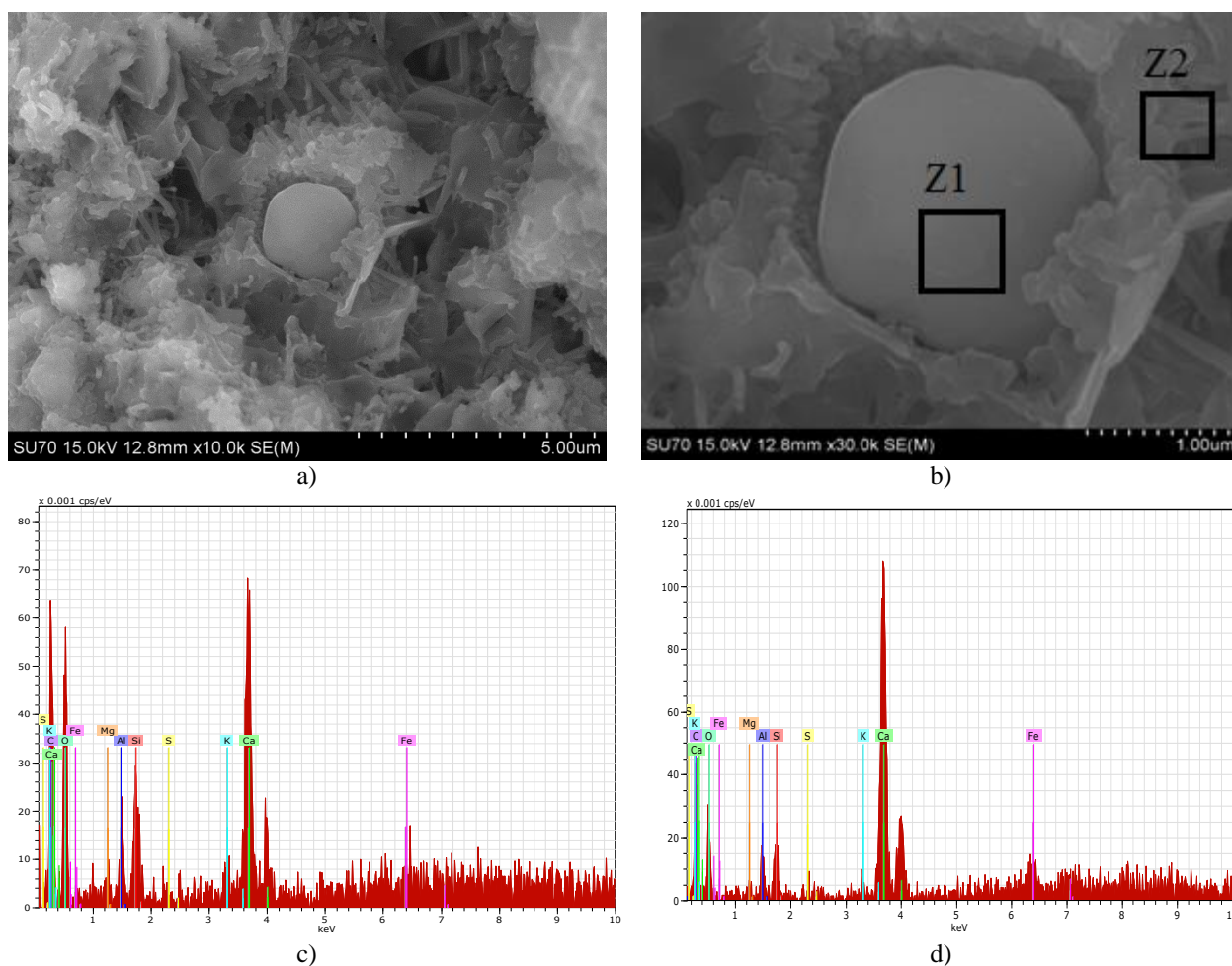


Figura 62. a) e b) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 19; c) Espectros de EDS da zona Z1 identificada na micrografia; d) Espectros de EDS da zona Z2 identificada na micrografia

É importante salientar que a amostra de argamassa de Cimento Natural Rápido Tigre apresenta uma morfologia semelhante à das amostras dos restantes cimentos naturais. No entanto, como referido, a amostra em questão revela uma maior irregularidade nas formas e dimensões das partículas, originando um arranjo diferente das mesmas. Esta argamassa apresenta assim uma morfologia mais densa que as anteriores, com uma maior concentração de partículas e possivelmente uma menor porosidade. Esta microestrutura vai de encontro às análises química e mineralógica já efetuadas, indicando diferenças entre este cimento e os restantes cimentos naturais. Desta forma, as argamassas de Cimento Natural Rápido Tigre possivelmente revelarão um comportamento distinto das argamassas compostas pelos restantes cimentos naturais.

A última amostra a ser analisada foi a correspondente à argamassa composta por Cimento Natural Prompt Vicat com incorporação de cinzas de cortiça (argamassa 26). Na Figura 63

encontram-se os resultados obtidos para esta amostra, verificando-se uma composição rica em cálcio, devida à calcite, cuja existência foi verificada por DRX. Verificam-se também quantidades consideráveis de silício (proveniente do quartzo e da gismondine) e de alumínio (proveniente da etringite e da gismondine).

Analisando a Figura 63.a) é possível verificar estruturas em forma de flocos, intercaladas com outras em forma de compridas fibras. Estas partículas encontram-se ampliadas na Figura 63.b). Na Figura 63.c) é possível verificar uma estrutura em forma de bola, semelhante às verificadas na análise de microscopia eletrônica de varrimento efetuada na amostra de cinzas de cortiça. A Figura 63.d) revela que a partícula com forma de bola além de apresentar cálcio na sua composição, também apresenta silício, alumínio, magnésio e fósforo e pequenas quantidades de cloro, enxofre, potássio e ferro.

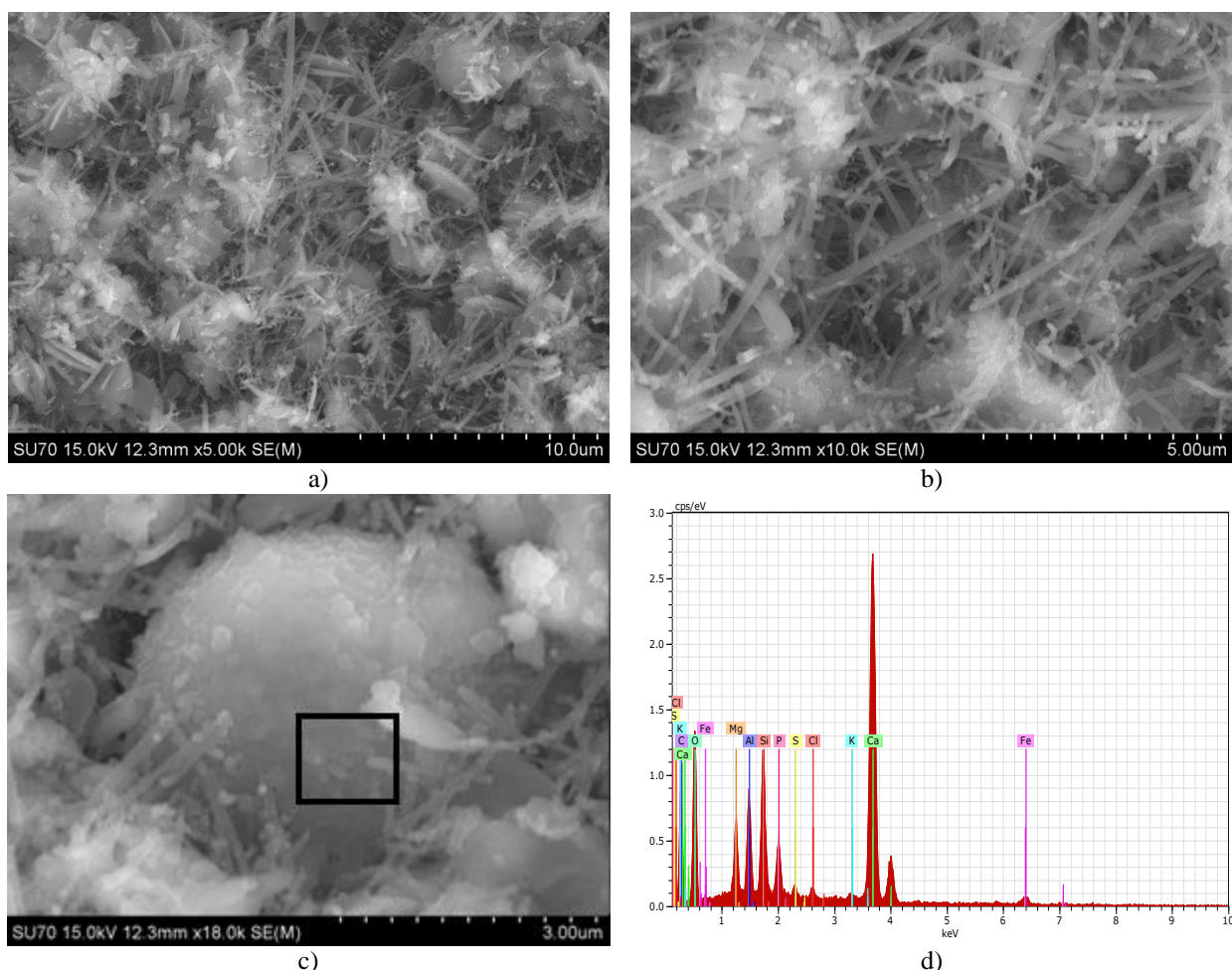


Figura 63. a), b) e c) Micrografia de microscopia eletrônica de varrimento referente à amostra da argamassa 26; d) Espectros de EDS da zona identificada na micrografia

7.3.3. Análise da resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão foi realizado com provetes de todas as argamassas, aos 28, 60 e 90 dias. Na Tabela 7 encontram-se representadas as formulações realizadas e a média dos valores obtidos no decorrer deste ensaio. Os mesmos resultados encontram-se também na Tabela A.III. 1, uma tabela comparativa final que se encontra no Anexo III.

Tabela 7. Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão das diferentes formulações

Argamassa	Traço Volumétrico	Máxima Tensão 28 dias (MPa)	Máxima Tensão 60 dias (MPa)	Máxima Tensão 90 dias (MPa)
1	1:2	0,48	0,34	0,48
2	0,5:0,5:2	0,41	0,47	0,67
3	1:0,5	1,40	0,99	1,26
4	1:1	1,15	0,94	0,92
5	1:2	0,72	0,71	0,70
6	0,75:0,25:1	2,74	2,27	2,42
7	0,5:0,5:1	1,32	2,03	1,54
8	0,75:0,25:1,5	1,53	1,99	1,95
9	0,5:0,5:1,5	0,62	0,46	0,59
10	1:2	4,06	3,70	3,48
11	0,5:0,5:2	2,29	2,04	2,03
12	1:0,5	0,58	0,49	0,41
13	1:1	1,31	1,14	1,01
14	1:2	0,25	0,26	0,32
15	0,75:0,25:1	2,91	2,63	2,81
16	0,5:0,5:1	1,34	1,94	2,04
17	0,75:0,25:1,5	0,89	0,89	0,88
18	0,5:0,5:1,5	0,78	0,73	0,79
19	1:0,5	2,77	2,19	3,07
20	1:1	1,57	2,03	1,92
21	1:2	0,79	0,66	0,64
22	0,75:0,25:1	1,06	1,42	1,16
23	0,5:0,5:1	1,15	1,00	0,95
24	0,75:0,25:1,5	0,96	0,94	0,96
25	0,5:0,5:1,5	0,56	0,61	0,57
26	1:2	0,49	0,59	0,57
27	1:2	0,47	0,55	0,64
28	1:2	0,73	0,75	0,68
12.R.0,5	1:0,5	2,02	1,55	1,37
13.R.0,5	1:1	1,38	1,16	1,36
14.R.0,5	1:2	0,69	0,78	0,96
19.R.0,5	1:0,5	3,77	3,38	4,53
20.R.0,5	1:1	2,42	1,89	2,47
21.R.0,5	1:2	0,72	0,79	0,82

7.3.3.1. Influência do tipo de argamassa

Analisando a Tabela 7 é possível verificar que os resultados das argamassas compostas por cal hidráulica natural e cimento Portland sugerem os resultados esperados, apresentando, respetivamente, os valores mais baixos e mais elevados de resistência à flexão.

As argamassas compostas por cal hidráulica natural apresentam em geral os valores mais baixos de resistência à flexão. Na argamassa 2, em que foi incorporada cal hidráulica natural com cal aérea, verifica-se um ligeiro incremento da resistência à flexão. Aos 90 dias, a argamassa 1 apresentava 0,48 MPa de resistência à flexão e a argamassa 2 apresentava 0,67 MPa. Este incremento resulta das argamassas com cal aérea carbonatarem mais facilmente nas condições de cura presentes. No entanto, este incremento é bastante reduzido e apenas ocorre a partir dos 60 dias. Por sua vez, os resultados obtidos para a resistência à flexão das argamassas com cimento Portland apresentam os valores mais elevados. No entanto, na argamassa 11, em que foi incorporado cimento Portland com cal aérea, verifica-se uma diminuição acentuada da resistência quando comparada com a resistência da argamassa 10, em que apenas foi incorporado cimento Portland. Aos 90 dias, a argamassa 10 apresentava 3,48 MPa de resistência à flexão e a argamassa 11 apresentava 2,03 MPa. Esta diminuição de resistência da argamassa 11 conduz a que algumas formulações com traço mais forte em cimento natural apresentem valores mais elevados de resistência à flexão.

Estes factos podem ser verificados analisando as Figuras 64, 65 e 66, onde os valores obtidos para a resistência à flexão das argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland são comparados com os valores obtidos para as argamassas dos restantes cimentos.

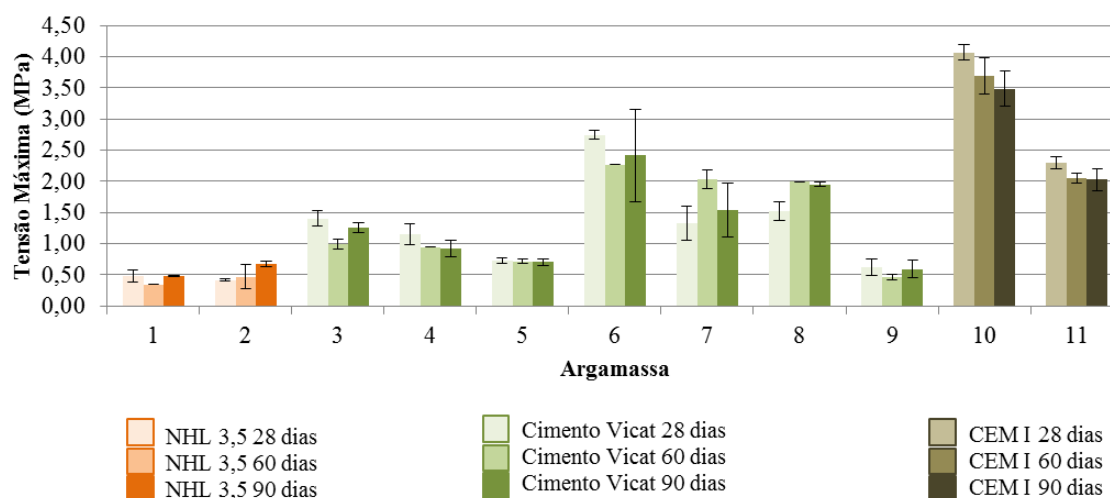


Figura 64. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Prompt Vicat e CEM I

Como se pode verificar na Figura 64, as argamassas com Cimento Prompt Vicat (argamassas 3 a 9) apresentam de uma forma geral valores de resistência à flexão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

Considerando as argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat (argamassas 3, 4 e 5), os valores obtidos para resistência à flexão revelam valores proporcionais à sua riqueza em cimento, apresentando a argamassa 3 o valor mais elevado (1,26 MPa) aos 90 dias. Por sua vez, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Prompt Vicat com cal aérea (argamassas 6, 7, 8 e 9), verifica-se um incremento da resistência à flexão, apresentando a argamassa 6 o valor mais elevado (2,42 MPa) aos 90 dias. Este facto pode resultar das argamassas com cal aérea carbonatarem mais facilmente nas condições de cura em questão.

Os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade da argamassa em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente melhores resistências à flexão.

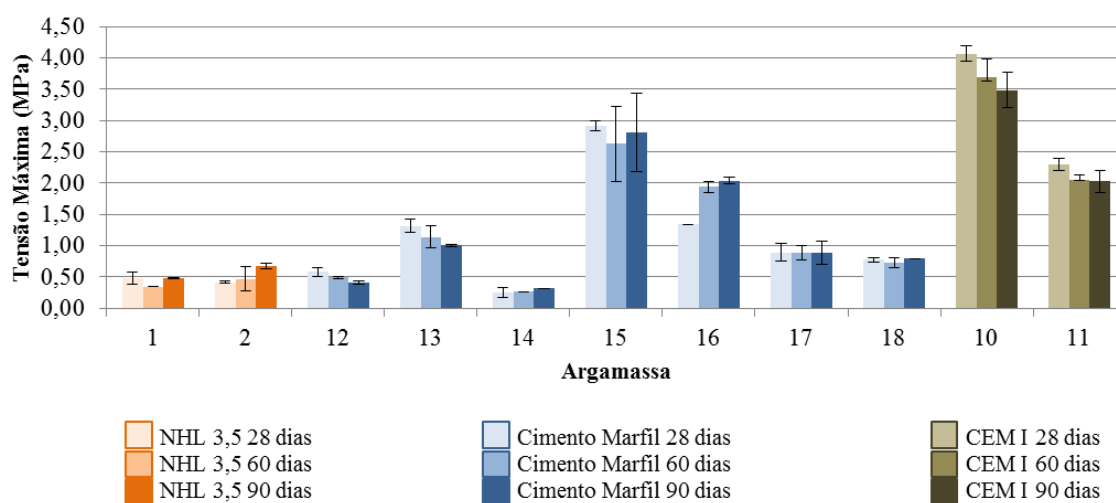


Figura 65. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I

Analisando a Figura 65, é possível verificar que as argamassas com Cimento Natural Marfil (argamassas 12 a 18) apresentam na sua maioria valores de resistência à flexão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

No entanto, tal como já foi referido em 7.2.1, nas argamassas 12 e 14 foi adicionada uma percentagem de água superior à necessária, que por consequência conduziu a uma diminuição de resistência à flexão. É de salientar que aos 90 dias a argamassa 12 apresentava uma resistência à flexão inferior à das argamassas 1 e 2, e que durante todo o tempo de cura, a argamassa 14 apresentou valores de resistência à flexão inferiores aos das argamassas 1 e 2. Desta forma, considerando as argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Marfil (argamassas 12, 13 e 14), a argamassa 13 revelou sempre os valores mais elevados de resistência à flexão, apresentando 1,01 MPa aos 90 dias.

Por sua vez, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Natural Marfil com cal aérea (argamassas 15, 16, 17 e 18) verifica-se um incremento da resistência à flexão. A argamassa 15 apresenta os valores mais elevados de resistência à flexão, sendo estes superiores aos obtidos para a argamassa de cimento Portland e cal aérea (argamassa 11). Aos 90 dias a argamassa 15 apresenta uma resistência à flexão de 2,81 MPa. Este comportamento já era esperado uma vez que as argamassas de Cimento Prompt Vicat apresentaram o mesmo comportamento perante a adição de cal aérea. Tal como referido, este facto pode resultar de as argamassas com cal aérea carbonatam mais facilmente nas condições de cura em questão.

Tal como referido para as argamassas de Cimento Natural Prompt Vicat, os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade da argamassa em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente melhores resistências à flexão.

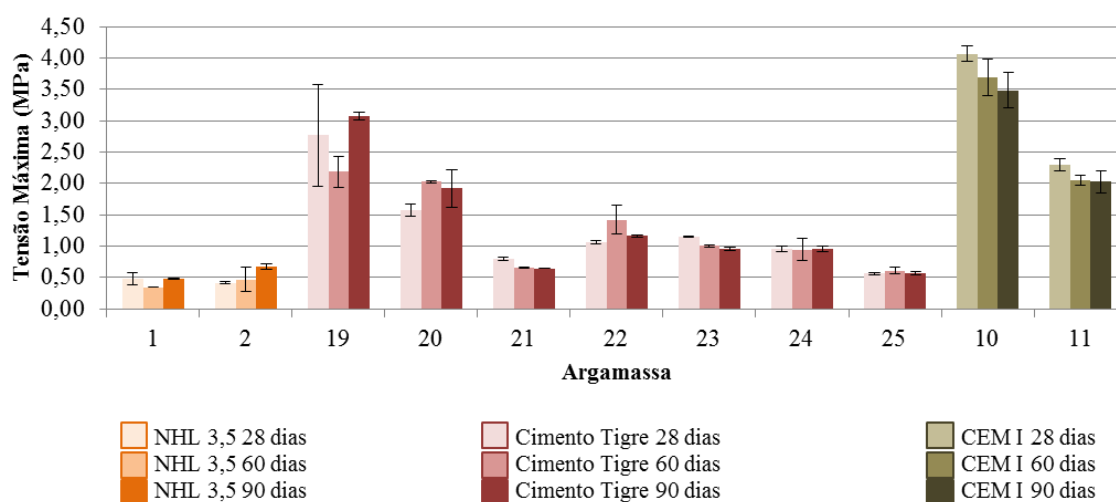


Figura 66. Resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Natural Tigre e CEM I

Os resultados obtidos para as argamassas com Cimento Natural Tigre (argamassas 19 a 25) encontram-se representados na Figura 66, sendo possível verificar valores de resistência à flexão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

Tal como no caso do Cimento Prompt Vicat, as argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Tigre (argamassas 19, 20 e 21), apresentam valores para resistência à flexão proporcionais à sua riqueza em cimento, apresentando a argamassa 19 o melhor comportamento face à flexão. Aos 90 dias a argamassa em questão apresentou 3,07 MPa de resistência à flexão, sendo este valor superior ao obtido para a argamassa de cimento Portland e cal aérea (argamassa 11).

Contrariamente aos valores obtidos para os restantes cimentos naturais, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Natural Tigre com cal aérea (argamassas 22, 23, 24 e 25), verifica-se uma diminuição da resistência à flexão, apresentando a argamassa 22 o melhor comportamento face à flexão (1,16 MPa) aos 90 dias. Este comportamento já era expectável uma vez que a introdução de cal aérea aumenta a porosidade das argamassas, que por consequência promove piores comportamentos na resistência à flexão. Além disso, as composições químicas e mineralógicas deste cimento destacam-se das dos restantes cimentos naturais, sendo expectável que o seu comportamento não fosse semelhante. É também de referir que as argamassas de Cimento Natural Tigre possivelmente serão menos porosas e mais densas, podendo a introdução de cal aérea nestas argamassas alterar a distribuição dos poros, tornando-as mais frágeis e promovendo piores resistências à flexão. Esta análise pode ser comprovada pelos resultados obtidos na análise de microscopia eletrónica de varrimento, onde a microestrutura da argamassa de Cimento Natural Tigre é considerada mais densa, com uma maior concentração de partículas e possivelmente com uma menor porosidade.

7.3.3.2. Influência da introdução de cinzas de cortiça

Como se pode verificar na Figura 67, a adição de cinzas de cortiça nas argamassas originou desempenhos bastante distintos, consoante o cimento natural em questão. Desta forma não se torna fácil avaliar a influência da adição de cinzas de cortiça nas argamassas em estudo.

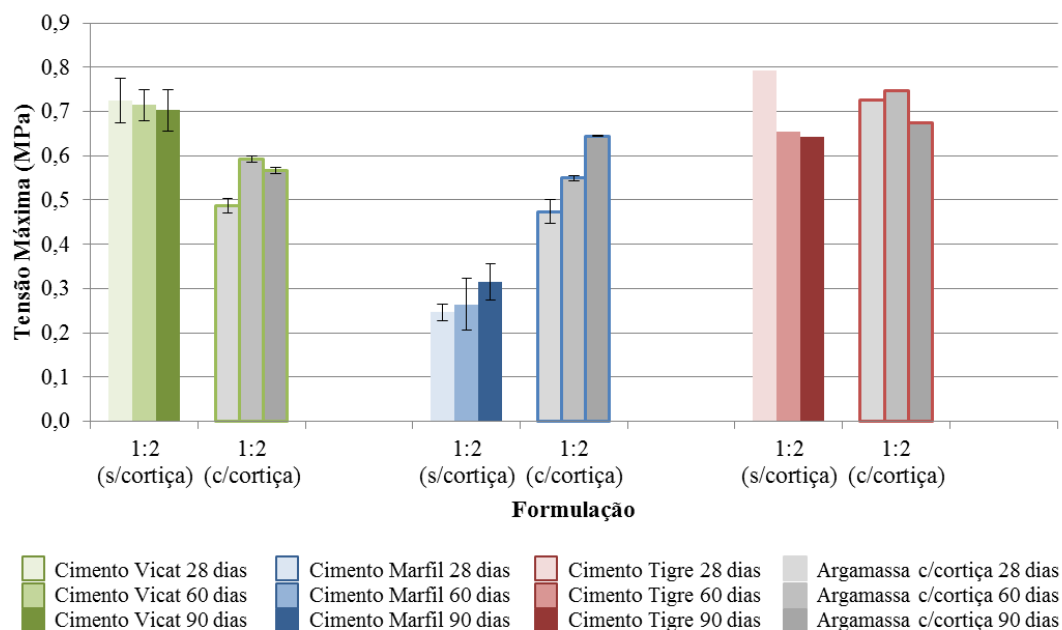


Figura 67. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça

No caso da argamassa de Cimento Prompt Vicat, a adição de cinzas de cortiça originou uma redução da resistência à flexão. Contrariamente, a adição de cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Tigre originou um ligeiro incremento na resistência à flexão.

A influência das cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Marfil é uma situação mais complexa. Na realidade, a adição de cinzas de cortiça originou um grande incremento na resistência à flexão. No entanto, este incremento deve-se às argamassas em comparação apresentam percentagens de água de amassadura bastante diferentes. À argamassa sem adição de cinzas de cortiça, argamassa 14, foi adicionada uma percentagem de água de amassadura ligeiramente superior à necessária, que por consequência conduziu a uma diminuição de resistência à flexão. Posteriormente, no momento de amassadura da argamassa com a mesma formulação e adição de cinzas de cortiça, argamassa 27, foi ajustada a percentagem de água.

Analizando as três argamassas em estudo, verifica-se que a argamassa de Cimento Natural Tigre com adição de cinzas de cortiça apresenta o melhor comportamento face à flexão.

7.3.3.3. Influência de retardador de presa

De acordo com o referido em 6.1, de modo a avaliar a trabalhabilidade das argamassas de cimento natural, optou-se pela introdução de retardador de presa Plastiment VZ da Sika.

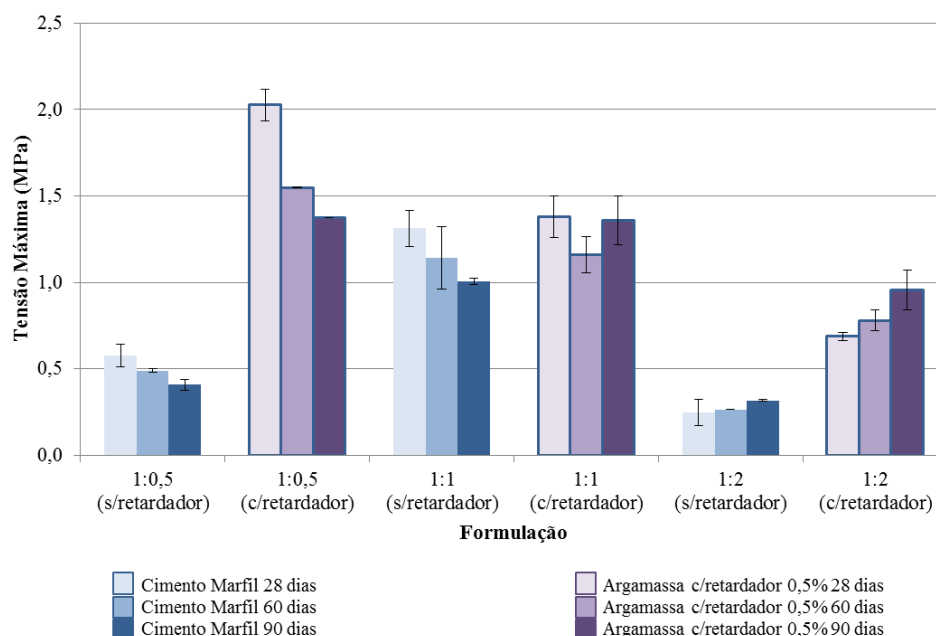


Figura 68. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador

Na Figura 68 encontram-se representadas as argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Marfil, podendo ser comparadas as suas resistências à flexão, consoante a utilização ou não de retardador de presa. No entanto, analogamente à adição de cinzas de cortiça, a influência do retardador de presa nas argamassas de Cimento Natural Marfil é uma situação complexa. Na realidade, a adição de retardador de presa originou incrementos na resistência à flexão nas três argamassas, sendo estes mais visíveis nas argamassas com formulações 1:0,5 e 1:2 (argamassas 12 e 14). No entanto, os incrementos que se verificam nestas duas argamassas devem-se às argamassas em comparação apresentam percentagens de água de amassadura bastante diferentes. Às argamassas sem adição de retardador de presa foram adicionadas percentagens de água de amassadura ligeiramente superiores às necessárias, que por consequência conduziram a diminuições de resistência à flexão. Posteriormente, no momento de amassadura das argamassas com a mesma formulação e adição de retardador de presa, as percentagens de água foram ajustadas.

Considerando a argamassa com formulação 1:1 (argamassa 13), verifica-se que a resistência à flexão aumentou ligeiramente com a introdução de retardador de presa. Este incremento da resistência à flexão talvez se deva ao facto de a utilização de retardador de presa, como o nome indica, adiar o início de presa, possibilitando uma melhor trabalhabilidade e diminuindo a percentagem de água de amassadura necessária.

Analisando as três argamassas em estudo, verifica-se que a argamassa com formulação 1:0,5 e adição de cinzas de cortiça apresenta o melhor comportamento face à flexão.

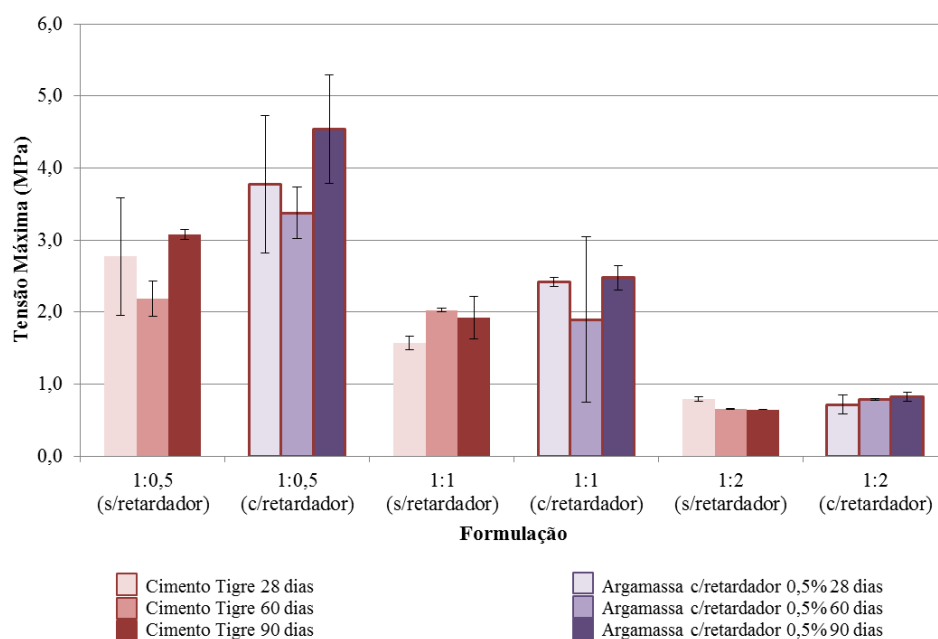


Figura 69. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à flexão das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador

Analisando a Figura 69 verifica-se que para as três argamassas de Cimento Natural Tigre a resistência à flexão aumentou com a introdução de retardador de presa. Este aumento é tanto maior quanto o teor em ligante, apresentando a argamassa com formulação 1:0,5 e adição de retardador de presa o melhor comportamento face à flexão. Tal como para o Cimento Natural Marfil, este incremento da resistência à flexão talvez se deva ao facto de a utilização de retardador de presa, como o nome indica, adiar o início de presa, possibilitando uma melhor trabalhabilidade e diminuindo a percentagem de água de amassadura necessária.

7.3.4. Análise da resistência à compressão

Tal como o ensaio de resistência à flexão, o ensaio de resistência à compressão foi realizado com provetes de todas as argamassas, aos 28, 60 e 90 dias. Na Tabela 8 encontram-se representadas as formulações realizadas e a média dos valores obtidos no decorrer deste ensaio. Os mesmos resultados encontram-se também na Tabela A.III. 1, uma tabela comparativa final que se encontra no Anexo III.

Tabela 8. Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão das diferentes formulações

Argamassa	Traço Volumétrico	Máxima Tensão 28 dias (MPa)	Máxima Tensão 60 dias (MPa)	Máxima Tensão 90 dias (MPa)
1	1:2	1,06	0,64	1,23
2	0,5:0,5:2	0,72	0,59	1,60
3	1:0,5	9,02	8,04	7,93
4	1:1	5,44	4,65	4,46
5	1:2	1,96	1,94	1,73
6	0,75:0,25:1	10,48	10,39	11,06
7	0,5:0,5:1	8,08	8,10	7,80
8	0,75:0,25:1,5	6,46	7,11	6,64
9	0,5:0,5:1,5	3,16	3,17	3,24
10	1:2	18,08	15,83	16,94
11	0,5:0,5:2	8,57	7,74	8,13
12	1:0,5	1,93	1,98	1,61
13	1:1	5,08	5,01	5,03
14	1:2	0,70	0,73	0,77
15	0,75:0,25:1	10,94	12,53	13,23
16	0,5:0,5:1	7,71	7,82	8,06
17	0,75:0,25:1,5	4,71	4,56	4,40
18	0,5:0,5:1,5	3,43	3,07	4,08
19	1:0,5	13,83	15,63	14,49
20	1:1	8,23	8,00	8,29
21	1:2	2,26	2,10	2,22
22	0,75:0,25:1	4,92	5,23	5,40
23	0,5:0,5:1	3,42	3,56	3,58
24	0,75:0,25:1,5	3,55	3,40	3,39
25	0,5:0,5:1,5	1,78	1,85	1,88
26	1:2	1,58	1,30	1,14
27	1:2	1,60	1,38	1,46
28	1:2	2,28	2,45	2,21
12.R.0,5	1:0,5	7,88	7,31	6,81
13.R.0,5	1:1	4,65	4,87	4,66
14.R.0,5	1:2	1,43	1,67	1,88
19.R.0,5	1:0,5	15,94	15,31	14,34
20.R.0,5	1:1	7,72	8,95	7,18
21.R.0,5	1:2	1,82	2,11	1,90

7.3.4.1. Influência do tipo de argamassa

Analisando a Tabela 8, é possível verificar que os resultados obtidos para as argamassas compostas por cal hidráulica natural e cimento Portland revelam de uma forma geral os valores mais baixos e mais elevados de resistência à compressão.

As argamassas compostas por cal hidráulica natural apresentam em geral os valores mais baixos de resistência à compressão, comparativamente com os restantes cimentos. Na argamassa 2, em que foi incorporada cal hidráulica natural com cal aérea, verifica-se um ligeiro incremento da resistência à compressão. Aos 90 dias, a argamassa 1 apresentava 1,23 MPa de resistência à compressão e a argamassa 2 apresentava 1,60 MPa. Este incremento talvez se deva às condições de cura em questão, mais favoráveis à carbonatação das argamassas com cal aérea.

Por sua vez, os resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas com cimento Portland apresentam geralmente os valores mais elevados. No entanto, na argamassa 11, em que foi incorporado cimento Portland com cal aérea, verifica-se uma diminuição bastante acentuada da resistência, comparativamente com a resistência da argamassa 10, conduzindo a que algumas formulações com traço mais forte em cimento natural apresentem valores mais elevados de resistência à compressão. É de salientar que aos 90 dias, a argamassa 10 apresentava 16,94 MPa de resistência à compressão e a argamassa 11 apresentava 8,13 MPa.

Estes factos podem ser verificados analisando as Figuras 70, 71 e 72, onde os valores obtidos para a resistência à compressão das argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland são comparados com os valores obtidos para as argamassas dos restantes cimentos.

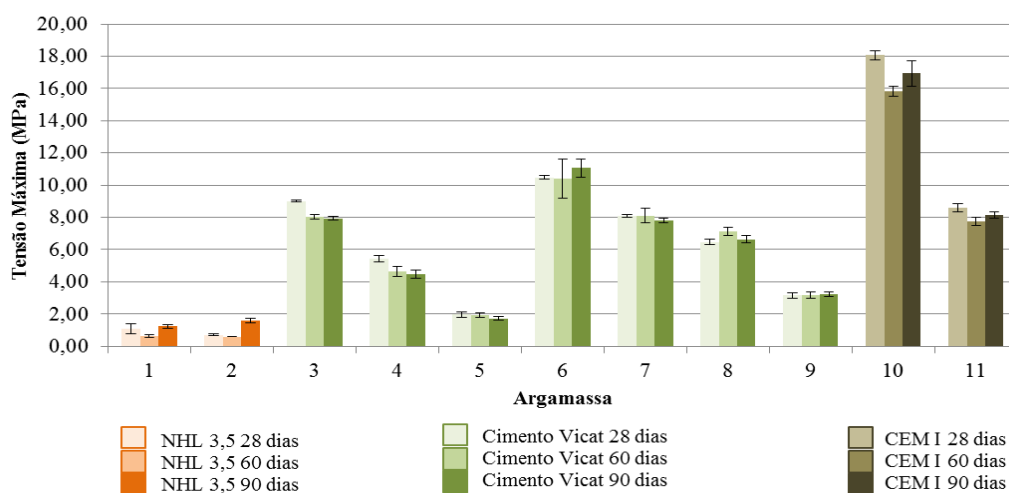


Figura 70. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I

Como se pode verificar na Figura 70, as argamassas com Cimento Prompt Vicat (argamassas 3 a 9) apresentam de uma forma geral valores de resistência à compressão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

Considerando as argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat (argamassas 3, 4 e 5), verifica-se que as amostras formuladas com traços mais fortes em cimento apresentam maiores valores de resistência à compressão, apresentando a argamassa 3 o valor mais elevado (7,93 MPa) aos 90 dias. Por sua vez, à semelhança do ensaio de resistência à flexão, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Prompt Vicat com cal aérea (argamassas 6, 7, 8 e 9), verifica-se um incremento da resistência à compressão, apresentando a argamassa 6 o valor mais elevado (11,06 MPa) aos 90 dias. Este facto está relacionado com o tipo de cura em questão ser mais favorável a argamassas que incorporem cal aérea, que carbonatam mais facilmente e atingem maiores valores de resistência. Analogamente ao ensaio de resistência à flexão, os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade da argamassa em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente melhores resistências à flexão.

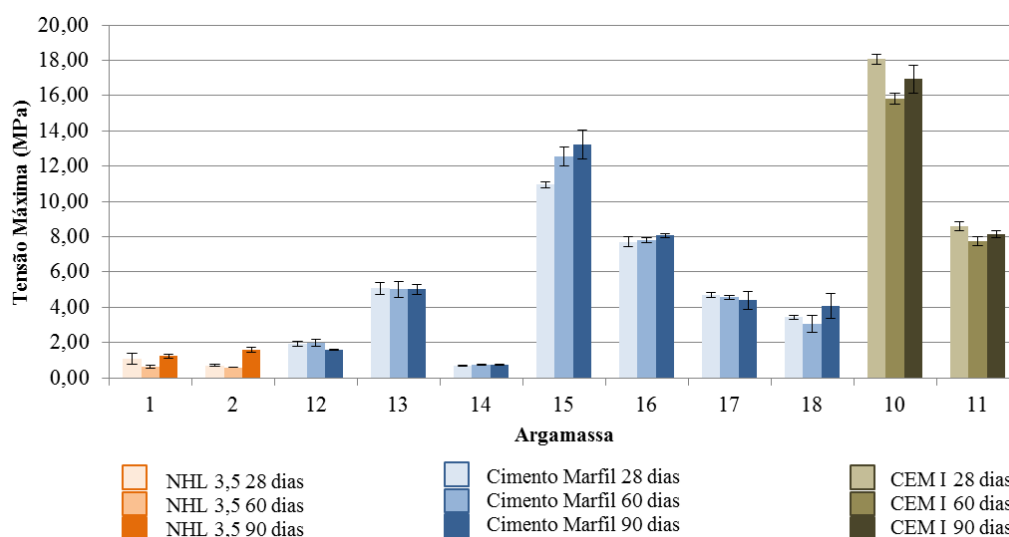


Figura 71. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I

Analisando a Figura 71, é possível verificar que as argamassas com Cimento Natural Marfil (argamassas 12 a 18) apresentam na sua maioria valores de resistência à compressão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

No entanto, tal como já foi referido, nas argamassas 12 e 14 foi adicionada uma percentagem de água superior à necessária, que por consequência conduziu a uma diminuição de resistência à compressão, que em alguns casos apresenta valores inferiores aos das argamassas de cal

hidráulica natural. Este é o caso da argamassa 14, que aos 28 e aos 90 dias apresenta valores inferiores aos das argamassas 1 e 2. Desta forma, considerando as argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Marfil (argamassas 12, 13 e 14), a argamassa 13 revelou sempre os valores mais elevados de resistência à flexão, apresentando 5,03 MPa aos 90 dias.

Por sua vez, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Natural Marfil com cal aérea (argamassas 15, 16, 17 e 18), verifica-se um incremento da resistência à compressão. A argamassa 15 apresenta os valores mais elevados de resistência à compressão, sendo estes superiores aos obtidos para a argamassa de cimento Portland e cal aérea (argamassa 11). Aos 90 dias a argamassa 15 apresenta uma resistência à compressão de 13,23 MPa. Este incremento já era esperado uma vez que as argamassas com cal aérea carbonatam mais facilmente nas condições de cura em questão.

É importante salientar o caso das argamassas 17 e 18, que com introdução de cal aérea revelam valores de resistência à compressão inferiores aos obtidos para a argamassa 13. Esta diferença de valores deve-se ao facto de a argamassa 13 apresentar um traço mais rico em ligante.

Analogamente ao ensaio de resistência à flexão, os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade da argamassa em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente melhores resistências à flexão.

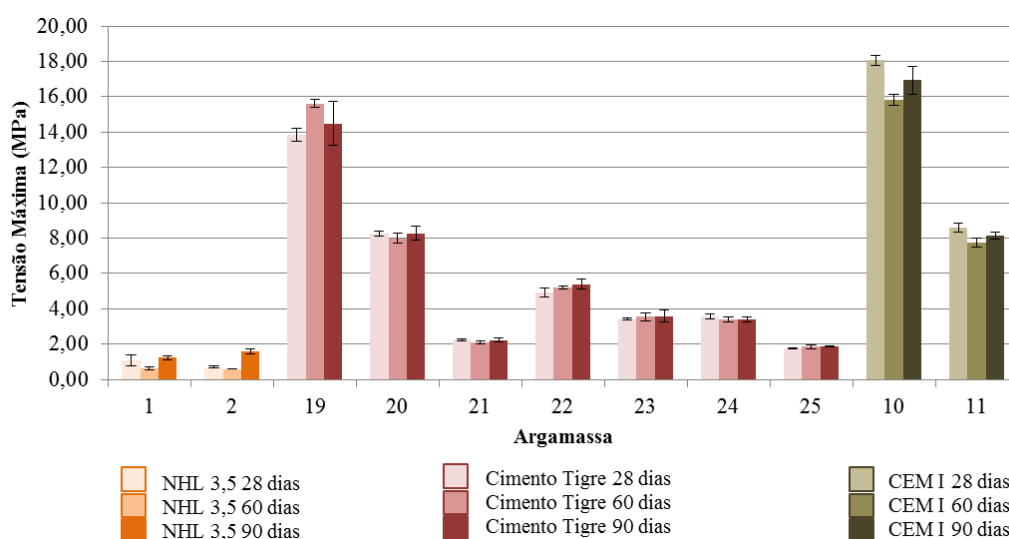


Figura 72. Resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I

Os resultados obtidos para as argamassas com Cimento Natural Tigre (argamassas 19 a 25) encontram-se representados na Figura 72, sendo possível verificar valores de resistência à compressão compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

Tal como no caso do Cimento Prompt Vicat, as argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Tigre (argamassas 19, 20 e 21), revelam valores de resistência à compressão proporcionais ao seu teor em cimento, apresentando a argamassa 19 o melhor comportamento face à compressão. Aos 90 dias a argamassa em questão apresentou 14,49 MPa de resistência à compressão, sendo este valor superior ao obtido para a argamassa de cimento Portland e cal aérea (argamassa 11).

No entanto, tal como se obteve na resistência à flexão, nas argamassas em que foi incorporado Cimento Natural Tigre com cal aérea (argamassas 22, 23, 24 e 25), verifica-se uma diminuição da resistência à compressão, apresentando a argamassa 22 o melhor comportamento face à compressão (5,40 MPa) aos 90 dias.

Tal como referido para o ensaio de resistência à flexão, o comportamento das argamassas de Cimento Natural Tigre à compressão revelou-se distinto do comportamento das argamassas dos restantes cimentos naturais. No entanto, já era expectável que o comportamento das argamassas dos três cimentos naturais não fosse semelhante, uma vez que a composição química e mineralógica deste cimento diferencia-o dos restantes cimentos. Além disso, as argamassas de Cimento Natural Tigre são menos porosas, mais densas, e a introdução de cal aérea nestas argamassas pode alterar a distribuição dos poros, tornando-as mais frágeis e promovendo piores resistências à compressão. Esta análise corrobora os resultados obtidos no ensaio de SEM, onde a microestrutura da argamassa de Cimento Natural Tigre é considerada mais densa e possivelmente menos porosa.

7.3.4.2. Influência da introdução de cinzas de cortiça

Como se pode verificar na Figura 73, os resultados obtidos para a resistência à compressão foram análogos aos obtidos para a resistência à flexão. Desta forma, a adição de cinzas de cortiça nas argamassas originou desempenhos bastante distintos, consoante o cimento natural em questão.

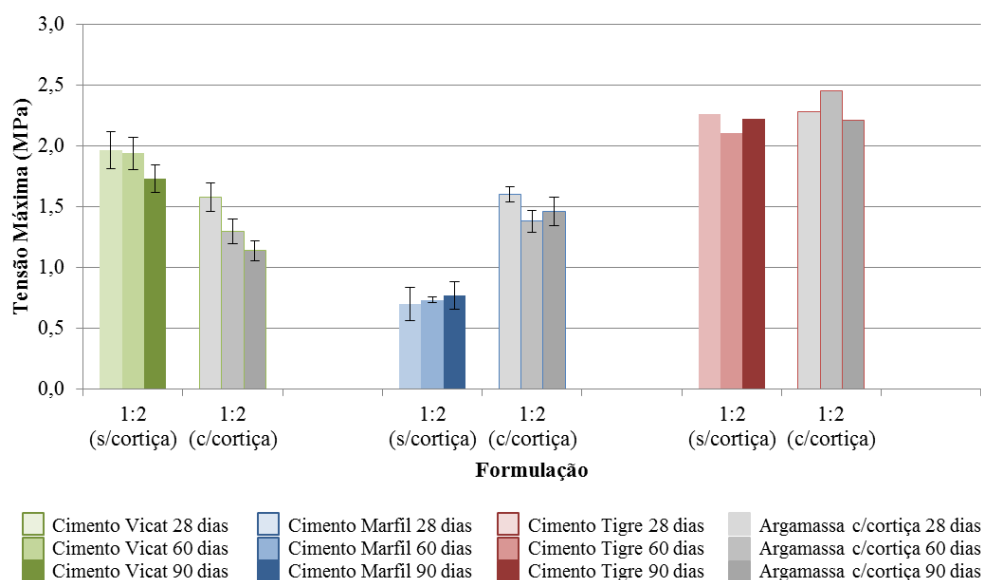


Figura 73. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça

No caso da argamassa de Cimento Prompt Vicat, a adição de cinzas de cortiça originou uma visível redução da resistência à compressão. Contrariamente, a adição de cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Tigre originou um ligeiro incremento na resistência à compressão.

No entanto, analogamente ao que se obteve para o ensaio de resistência à flexão, a influência das cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Marfil é uma situação mais complexa. A adição de cinzas de cortiça originou um grande incremento na resistência à compressão. No entanto, este incremento deve-se às argamassas em comparação apresentarem percentagens de água de amassadura bastante diferentes. À argamassa sem adição de cinzas de cortiça, argamassa 14, foi adicionada uma percentagem de água de amassadura ligeiramente superior à necessária, que por consequência conduziu a uma diminuição de resistência à compressão.

Analisando as três argamassas em estudo, verifica-se que a argamassa de Cimento Natural Tigre com adição de cinzas de cortiça apresenta o melhor comportamento face à compressão.

7.3.4.3. Influência da introdução de retardador de presa

Tal como referido em 6.1, de modo a avaliar a trabalhabilidade das argamassas de cimento natural, optou-se pela introdução de retardador de presa Plastiment VZ da Sika.

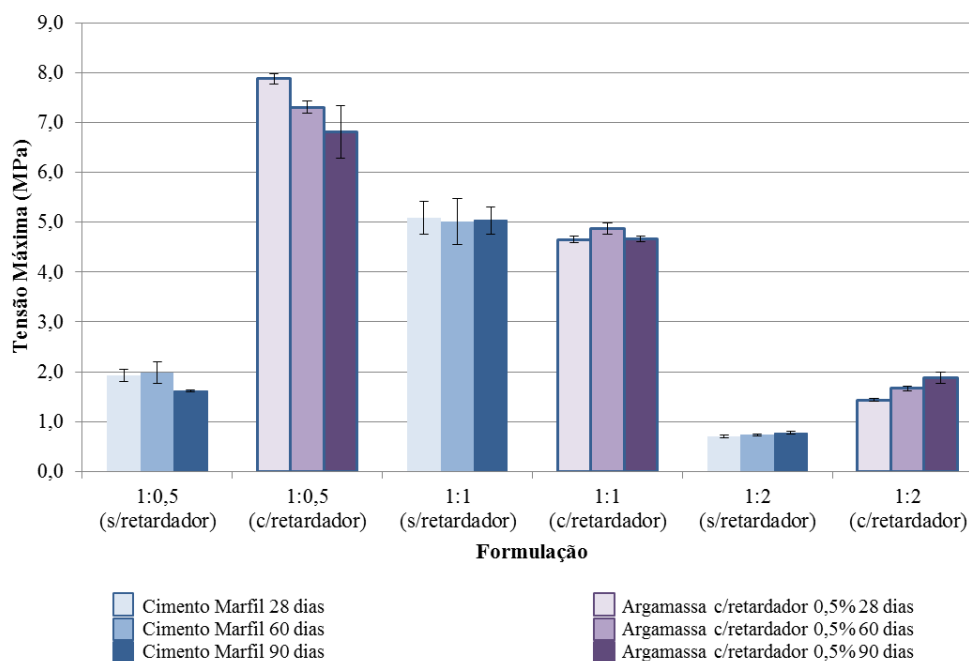


Figura 74. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador

Na Figura 74 encontram-se representadas as argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Marfil, podendo ser comparadas as suas resistências à compressão, consoante a utilização ou não de retardador de presa.

No entanto, analogamente à adição de cinzas de cortiça, a influência do retardador de presa nas argamassas de Cimento Natural Marfil é uma situação complexa. A adição de retardador de presa originou incrementos na resistência à compressão das argamassas com formulações 1:0,5 e 1:2 (argamassas 12 e 14). No entanto, os incrementos que se verificam nestas duas argamassas devem-se às argamassas em comparação apresentarem percentagens de água de amassadura bastante diferentes. Às argamassas sem adição de retardador de presa foram adicionadas percentagens de água de amassadura ligeiramente superiores às necessárias, que por consequência conduziram a diminuições de resistência à compressão. Posteriormente, no momento de amassadura das argamassas com a mesma formulação e adição de retardador de presa, as percentagens de água foram ajustadas.

Considerando a argamassa com formulação 1:1 (argamassa 13), verifica-se que a resistência à compressão diminuiu ligeiramente com a introdução de retardador de presa, não se tratando de uma diminuição de valor significativo.

Analizando as três argamassas em estudo, verifica-se que a argamassa com formulação 1:0,5 e adição de retardador de presa apresenta o melhor comportamento face à compressão.

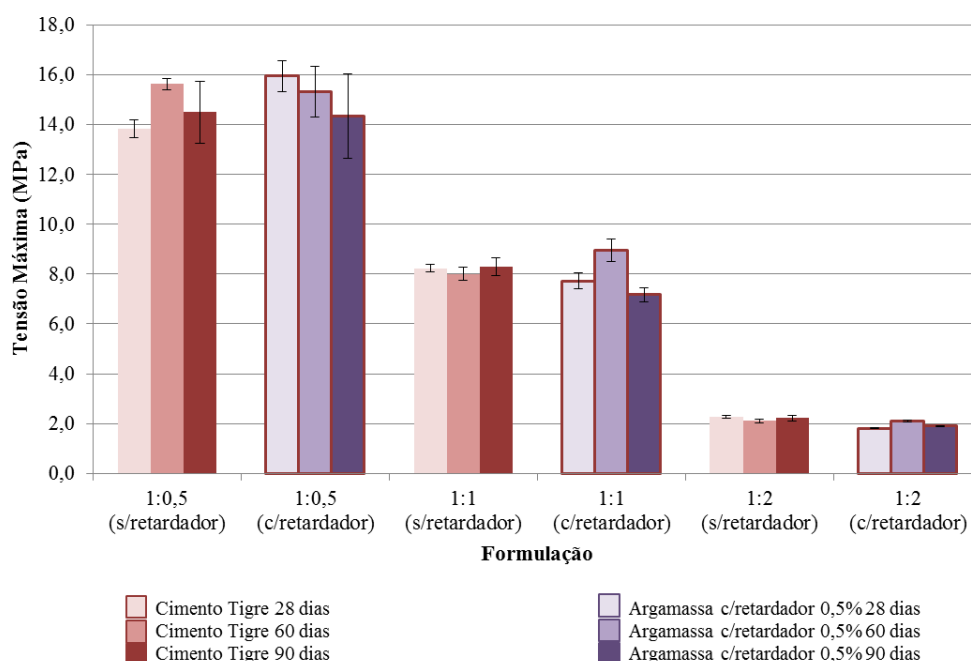


Figura 75. Gráfico comparativo dos resultados obtidos no ensaio à compressão das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador

Analizando a Figura 75 é possível comparar a resistência à compressão das argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Tigre, consoante a utilização ou não de retardador de presa. Verifica-se assim que para as três argamassas em questão (argamassas 19, 20 e 21), a resistência à compressão não revelou alterações significativas com a introdução de retardador de presa, apresentando a argamassa com formulação 1:0,5 e adição de retardador de presa o melhor comportamento face à compressão.

Estes resultados vão de acordo como as indicações do fabricante, que garantem que a utilização deste retardador de presa possibilita uma melhor trabalhabilidade, não alterando as resistências mecânicas.

7.3.5. Análise da profundidade de carbonatação

O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) carbonata quando se encontra em contacto com o dióxido de carbono da atmosfera, reagindo e formando carbonato de cálcio (CaCO_3), que em contacto com a fenolftaleína é insolúvel.

Desta forma, o ensaio de profundidade de carbonatação ocorre de fora para dentro dos provetes, avaliando a extensão das zonas em que a solução de fenolftaleína em contacto com uma superfície alcalina muda de cor. Esta alteração dá-se na presença do hidróxido de cálcio, ou seja, cal não carbonatada.

Na Tabela 9 encontram-se representadas as formulações realizadas e os valores registados no decorrer dos 28, 60 e 90 dias. Os mesmos resultados encontram-se também na Tabela A.III. 1, uma tabela comparativa final que se encontra no Anexo III.

Tabela 9. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação

Argamassa	Traço Volumétrico	Carbonatação 28 dias (mm)	Carbonatação 60 dias (mm)	Carbonatação 90 dias (mm)
1	1:2	2,1	6,9	7,5
2	0,5:0,5:2	3,5	7,3	8,5
3	1:0,5	4,0	Reação completa	Reação completa
4	1:1	4,5	Reação completa	Reação completa
5	1:2	10,5	Reação completa	Reação completa
6	0,75:0,25:1	2,0	2,8	4,8
7	0,5:0,5:1	2,2	3,4	5,5
8	0,75:0,25:1,5	3,5	5,5	6,5
9	0,5:0,5:1,5	4,0	6,2	7,0
10	1:2	2,1	4,2	4,9
11	0,5:0,5:2	3,0	4,7	6,5
12	1:0,5	Reação completa	Reação completa	Reação completa
13	1:1	Reação completa	Reação completa	Reação completa
14	1:2	Reação completa	Reação completa	Reação completa
15	0,75:0,25:1	2,2	4,6	5,0
16	0,5:0,5:1	1,6	5,1	5,5
17	0,75:0,25:1,5	3,2	5,9	8,4
18	0,5:0,5:1,5	3,9	9,5	9,6
19	1:0,5	2,0	2,6	4,6
20	1:1	2,6	4,7	6,3
21	1:2	6,1	10,0	13,9
22	0,75:0,25:1	2,0	4,0	5,1
23	0,5:0,5:1	2,9	5,1	6,2
24	0,75:0,25:1,5	3,6	6,1	8,4
25	0,5:0,5:1,5	3,9	8,1	9,7
26	1:2	Reação completa	Reação completa	Reação completa
27	1:2	Reação completa	Reação completa	Reação completa
28	1:2	7,0	10,1	Reação completa
12.R.0,5	1:0,5	Reação completa	Reação completa	Reação completa
13.R.0,5	1:1	Reação completa	Reação completa	Reação completa
14.R.0,5	1:2	Reação completa	Reação completa	Reação completa
19.R.0,5	1:0,5	1,0	2,4	4,9
20.R.0,5	1:1	2,9	4,2	6,4
21.R.0,5	1:2	6,8	8,2	Reação completa

7.3.5.1. Influência do tipo de argamassa

Analisando a Tabela 9, é possível verificar que os resultados obtidos para as argamassas compostas por cal hidráulica natural e cimento Portland se encontram dentro do esperado, apresentam-se de uma forma geral menos carbonatadas que as amostras compostas com cimento natural.

É também possível verificar que as argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat e Cimento Natural Marfil completam mais rapidamente a reação de carbonatação, apresentando valores inferiores quando nas argamassas é adicionada cal aérea. Por sua vez, nas argamassas de Cimento Natural Tigre a reação de carbonatação é mais lenta, não se verificando uma completa carbonatação durante os 90 dias de cura.

Estes factos podem ser verificados analisando as Figuras 76, 77 e 78, onde os valores obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland são comparados com os valores obtidos para as argamassas dos restantes cimentos.

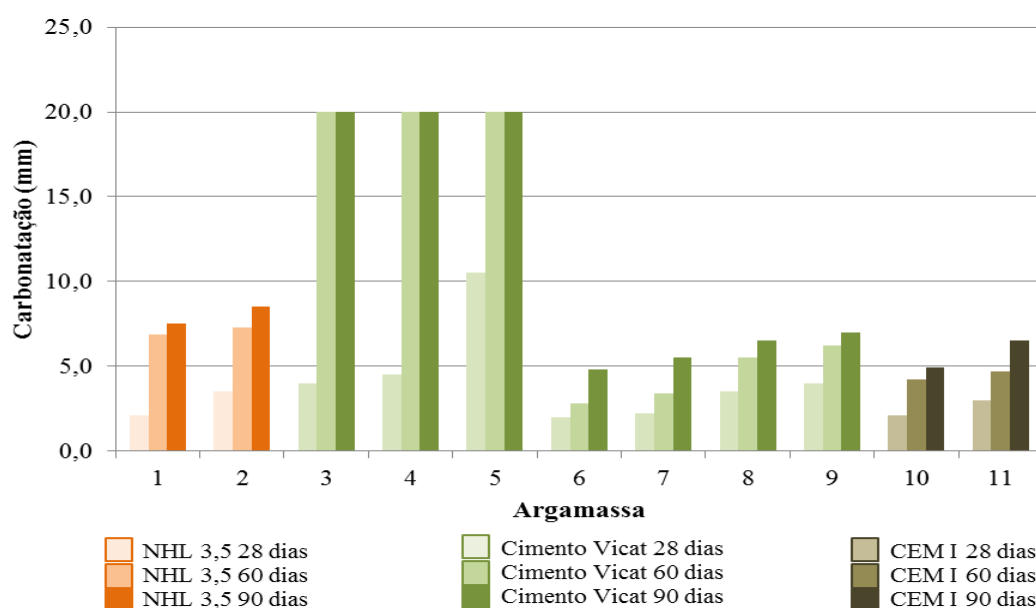


Figura 76. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I

Os resultados obtidos para as argamassas com Cimento Prompt Vicat (argamassas 3 a 9) encontram-se representados na Figura 76, verificando-se valores de profundidade de carbonatação maioritariamente superiores aos valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland (argamassas 10 e 11).

Nas argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat (argamassas 3, 4 e 5) a profundidade de carbonatação é inversamente proporcional aos seus teores em cimento, revelando-se a argamassa 3 a menos carbonatada e a argamassa 5 a mais carbonatada. No entanto, aos 60 dias as três argamassas já se encontravam completamente carbonatadas.

Constata-se também que as formulações com Cimento Prompt Vicat e cal aérea (6, 7, 8 e 9) se apresentam menos carbonatadas do que formulações compostas só com ligante hidráulico. Este comportamento pode dever-se à libertação de água resultante da reação de carbonatação, podendo esta água favorecer a hidratação do componente hidráulico.

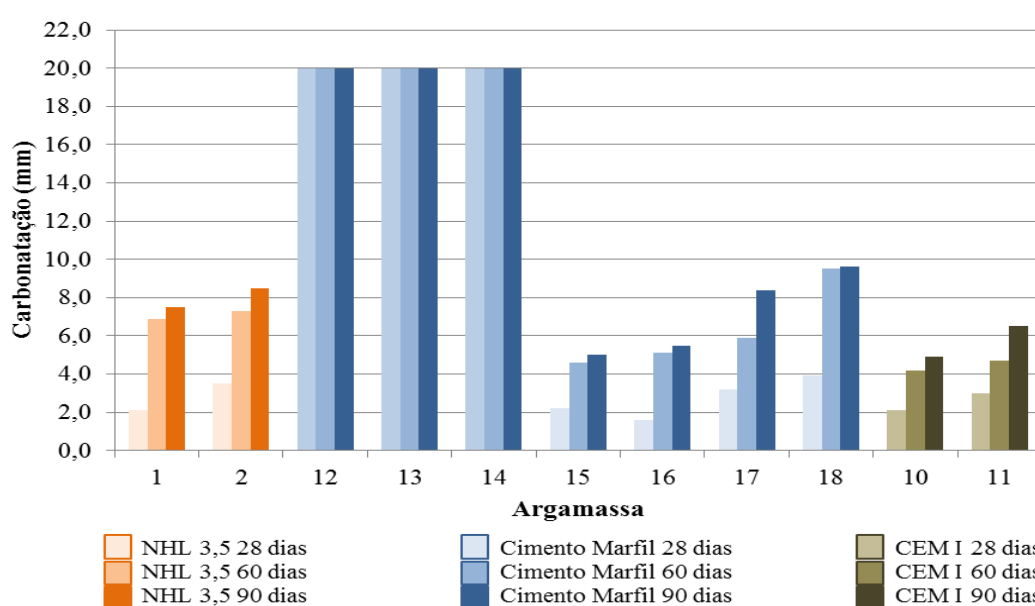


Figura 77. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Natural Marfil e CEM I

Os resultados obtidos para as argamassas com Cimento Natural Marfil (argamassas 12 a 18) encontram-se representados na Figura 77, verificando-se valores de profundidade de carbonatação maioritariamente superiores aos valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11).

Nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Marfil (argamassas 12, 13 e 14) aos 28 dias as três argamassas já se encontravam completamente carbonatadas. Constata-se também que as formulações com Cimento Natural Marfil e cal aérea (15, 16, 17 e 18) se apresentam menos carbonatadas que as formulações compostas só com ligante hidráulico.

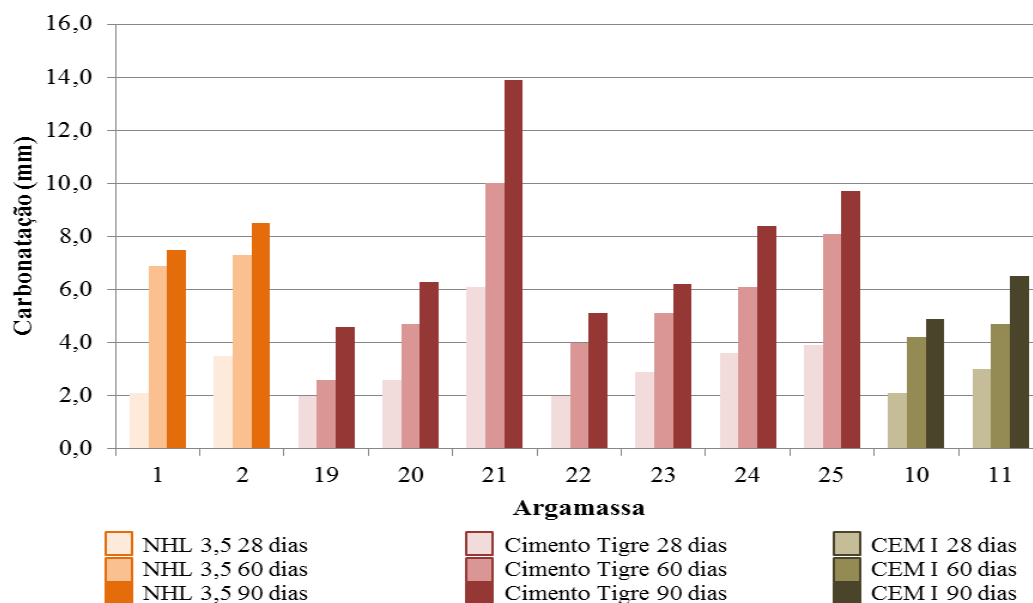


Figura 78. Resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I

Analisando a Figura 78 verifica-se que contrariamente ao que ocorre com os restantes cimentos naturais, os resultados obtidos para as argamassas com Cimento Natural Tigre (argamassas 19 a 25) não revelam uma discrepância tão grande de valores quando comparados com os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural (argamassas 1 e 2) e para as argamassas de cimento Portland I (argamassas 10 e 11). No entanto, comparando as argamassas 1, 21 e 10, argamassas de diferentes ligantes mas com o mesmo traço, é possível verificar que a argamassa de Cimento Natural Tigre (argamassa 21) se encontra mais carbonatada e a argamassa de Cimento Portland (argamassa 10) se encontra menos carbonatada.

Nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Tigre (argamassas 19, 20 e 21) a profundidade de carbonatação é inversamente proporcional aos seus teores em cimento, revelando-se a argamassa 19 a menos carbonatada e a argamassa 21 a mais carbonatada. Constata-se também que tal como com os restantes cimentos naturais, as formulações com Cimento Natural Tigre e cal aérea (22, 23, 24 e 25) apresentam-se menos carbonatadas do que formulações compostas só com ligante hidráulico.

7.3.5.2. Influência da introdução de cinzas de cortiça

Relativamente à introdução de cinzas de cortiça nas argamassas de cimento natural, os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação podem ser analisados na Figura 79.

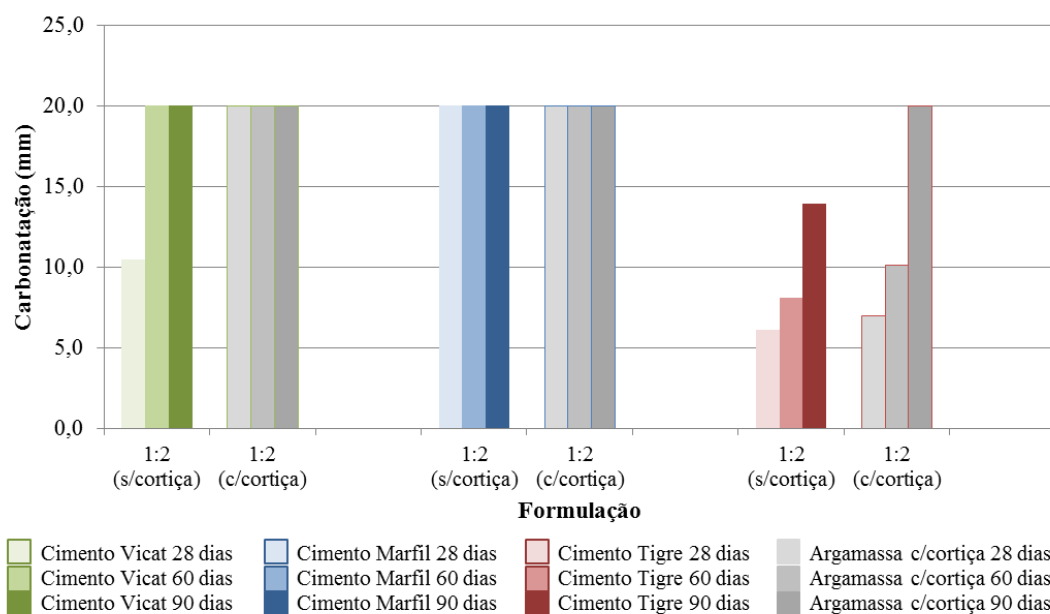


Figura 79. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça

No caso da argamassa de Cimento Prompt Vicat, a adição de cinzas de cortiça acelerou a reação de carbonatação, uma vez que contrariamente ao que aconteceu com a argamassa sem incorporação de cinzas de cortiça, aos 28 dias a argamassa com incorporação de cinzas de cortiça já estava toda carbonatada. Analogamente, a introdução de cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Tigre acelerou ligeiramente a reação de carbonatação, uma vez que aos 90 dias a reação de carbonatação da argamassa com introdução de cinzas de cortiça já se encontrava terminada, contrariamente ao que acontecia com a argamassa sem introdução de cinzas de cortiça. No entanto na argamassa de Cimento Natural Marfil não é possível avaliar a influência da incorporação de cinzas de cortiça, uma vez que sem a sua incorporação, aos 28 dias a reação de carbonatação já estava completa. O mesmo se verifica com a adição de cinzas de cortiça.

Na realidade, durante a realização das argamassas em que foram incorporadas cinzas de cortiça, foi possível verificar que este material funciona como retardador de presa, aumentando a trabalhabilidade das argamassas e possibilitando a utilização de menos água de amassadura, uma vez que se verificou alguma exsudação. Assim, a utilização de cinzas de cortiça nas argamassas proporcionou maiores porosidades, que por consequência conduzem a reações de carbonatação mais rápidas.

É também de salientar que com a introdução de cinzas de cortiça em quantidade igual a 10% da quantidade de cimento natural, há uma diminuição de 10% na quantidade de cimento

natural utilizado. Desta forma, há uma menor quantidade de ligante para hidratar, conduzindo a que a reação de carbonatação seja mais rápida. É importante questionar se a exsudação ocorrida se deverá ao facto de ser incorporada menor quantidade de cimento natural.

Verifica-se assim que a adição de cinzas de cortiça acelera a reação de carbonatação nas argamassas em estudo.

7.3.5.3. Influência da introdução de retardador de presa

Relativamente à introdução de retardador de presa Plastiment VZ da Sika nas argamassas de Cimento Natural Marfil, os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação podem ser analisados na Figura 80.

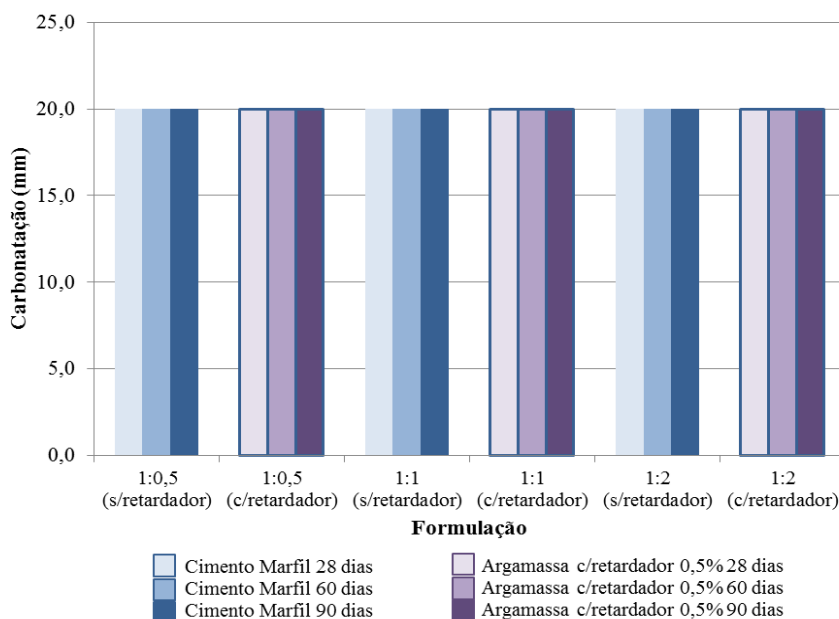


Figura 80. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador

Na Figura 80 encontram-se representadas as argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Marfil, podendo ser comparadas as suas profundidades de carbonatação, consoante a utilização ou não de retardador de presa.

No entanto, aos 28 dias a reação de carbonatação já estava completa, verificando-se o mesmo com a introdução de retardador de presa.

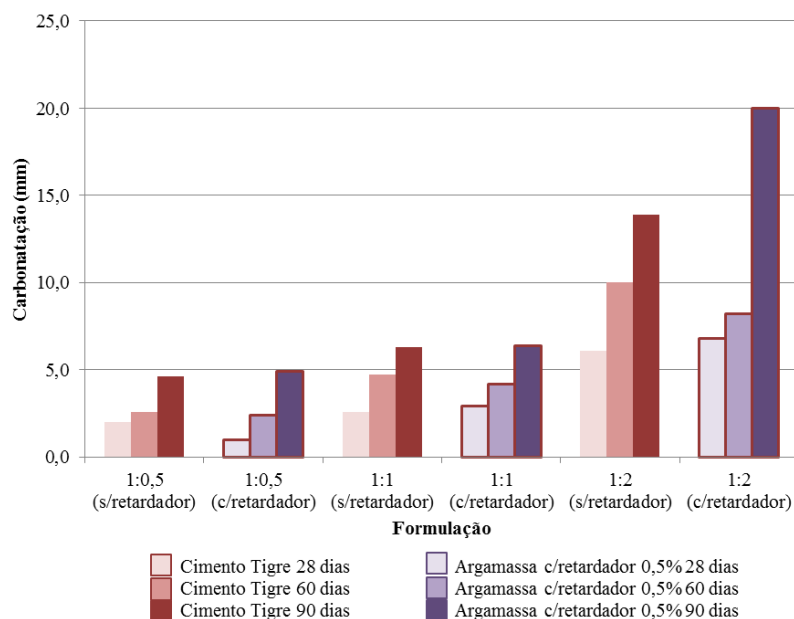


Figura 81. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de carbonatação das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador

Analisando a Figura 81 é possível comparar a profundidade de carbonatação das argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Tigre, consoante a utilização ou não de retardador de presa. Nas formulações 1:0,5 e 1:1 (argamassas 19 e 20) a introdução de retardador de presa não originou alterações significativas na profundidade de carbonatação. No entanto, na formulação 1:2 (argamassa 21) a introdução de retardador de presa acelerou ligeiramente a reação de carbonatação, uma vez que aos 90 dias a reação de carbonatação da argamassa já se encontrava terminada, contrariamente ao que acontecia com a argamassa sem introdução de retardador de presa.

Estes resultados vão de acordo como as indicações do fabricante, que garantem que a utilização deste retardador de presa acelera o endurecimento após a presa.

7.3.6. Análise da absorção de água por capilaridade

O coeficiente de capilaridade é um fator característico de cada argamassa que permite avaliar o seu comportamento face ao contacto direto com a água. Na Tabela 10 encontram-se representadas as formulações realizadas e os valores registados no decorrer dos 28, 60 e 90 dias. Os mesmos resultados encontram-se na Tabela A.III. 2 que se encontra no Anexo III.

Tabela 10. Resultados obtidos para os coeficientes de capilaridade

Argamassa	Traço Volumétrico	Capilaridade 28 dias (kg/m ² .h ^{0,5})	Capilaridade 60 dias (kg/m ² .h ^{0,5})	Capilaridade 90 dias (kg/m ² .h ^{0,5})
1	1:2	15,00	14,57	15,17
2	0,5:0,5:2	13,25	12,73	15,54
3	1:0,5	6,49	7,80	7,60
4	1:1	6,68	6,86	8,47
5	1:2	7,96	7,96	7,96
6	0,75:0,25:1	3,20	4,15	4,07
7	0,5:0,5:1	4,39	5,69	5,64
8	0,75:0,25:1,5	3,63	5,17	4,53
9	0,5:0,5:1,5	10,09	11,14	10,89
10	1:2	4,39	4,02	4,15
11	0,5:0,5:2	5,57	7,16	7,09
12	1:0,5	14,68	16,00	15,29
13	1:1	8,54	9,05	9,47
14	1:2	18,58	19,92	19,60
15	0,75:0,25:1	3,80	4,72	4,65
16	0,5:0,5:1	6,66	7,83	7,66
17	0,75:0,25:1,5	8,51	8,95	11,03
18	0,5:0,5:1,5	11,05	11,60	11,85
19	1:0,5	4,89	5,68	5,50
20	1:1	6,70	7,62	6,91
21	1:2	16,46	16,48	15,88
22	0,75:0,25:1	11,91	13,21	12,01
23	0,5:0,5:1	13,38	15,31	14,80
24	0,75:0,25:1,5	11,86	12,07	13,21
25	0,5:0,5:1,5	16,64	17,57	17,76
26	1:2	12,21	13,60	14,59
27	1:2	13,84	16,04	15,26
28	1:2	14,50	13,95	14,80
12.R.0,5	1:0,5	9,39	11,38	12,25
13.R.0,5	1:1	9,40	10,63	11,27
14.R.0,5	1:2	15,94	15,93	15,45
19.R.0,5	1:0,5	3,78	6,96	5,59
20.R.0,5	1:1	7,06	7,06	7,64
21.R.0,5	1:2	14,70	15,23	16,73

7.3.6.1. Influência do tipo de argamassa

Considerando os valores de coeficiente de capilaridade representados na Tabela 10, é possível verificar que as argamassas compostas por cal hidráulica natural e cimento Portland apresentam de uma forma geral os valores mais elevados e mais baixos de coeficiente de capilaridade.

É importante salientar que a introdução de cal aérea nas argamassas de cal hidráulica natural e nas argamassas de cimento Portland originou comportamentos diferentes. Na argamassa 2 onde foi incorporada cal hidráulica natural e cal aérea, o coeficiente de capilaridade diminuiu quando comparado com o coeficiente de capilaridade da argamassa composta unicamente por cal hidráulica natural. Este facto apenas não se verificou aos 90 dias, onde a argamassa 1 apresentava um coeficiente de capilaridade de $15,17 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ e a argamassa 2 apresentava um coeficiente de capilaridade de $15,54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$. Por sua vez, como esperado, na argamassa 11 onde foi incorporado cimento Portland e cal aérea, o coeficiente de capilaridade aumentou quando comparado com o coeficiente de capilaridade da argamassa composta unicamente por cimento Portland. Aos 90 dias a argamassa 10 apresentava um coeficiente de capilaridade de $4,15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ e a argamassa 11 apresentava um coeficiente de capilaridade de $7,09 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$.

Estes factos podem ser verificados analisando as Figuras 82, 83, e 84, onde os valores obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland são comparados com os valores obtidos para as argamassas dos restantes cimentos.

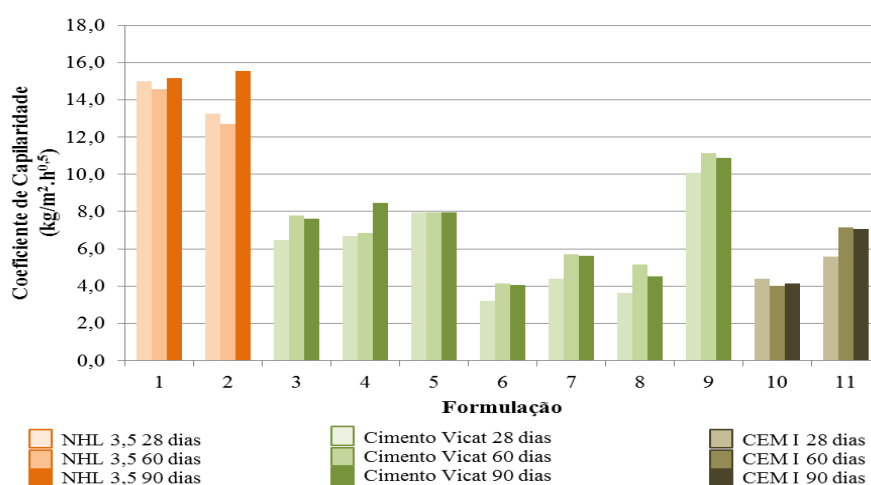


Figura 82. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Prompt Vicat e CEM I

Analisando a Figura 82 verifica-se que as argamassas compostas por Cimento Prompt Vicat apresentam valores de coeficiente de capilaridade compreendidos entre os valores relativos às argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland. Este facto é visível nas argamassas 1, 5 e 10, em que as três argamassas apresentam o mesmo traço. Aos 90 dias a argamassa 1 apresenta o maior coeficiente de capilaridade ($15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) e a argamassa 10 apresenta o menor coeficiente de capilaridade ($4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$), encontrando-se o coeficiente de capilaridade da argamassa 5 ($8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) compreendido entre os referidos anteriormente.

Verifica-se também que nas argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat, o coeficiente de capilaridade é inversamente proporcional ao teor em cimento. Considerando as argamassas 3, 4 e 5, constata-se que a argamassa 5 apresenta maior capacidade de absorver água, podendo este resultado dever-se ao facto desta argamassa apresentar um traço mais fraco, ou seja, maior quantidade de agregado e por isso maior facilidade em absorver água. Aos 90 dias esta argamassa apresenta um coeficiente de capilaridade de $7,96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$.

Relativamente à introdução de cal aérea nas argamassas de Cimento Prompt Vicat, esta proporcionou uma diminuição no coeficiente de capilaridade, exceto no caso da argamassa 9 cujo coeficiente de capilaridade é bastante superior ao das restantes argamassas ($10,89 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$). No entanto, de um modo geral, verifica-se que as argamassas de Cimento Prompt Vicat e cal aérea obtêm maiores valores de coeficiente de capilaridade nas formulações com traços mais ricos em cal aérea. Estes valores podem também ser influenciados pela quantidade de agregado que compõem as argamassas, verificando-se que as amostras com maior quantidade de areia apresentam maiores valores de coeficiente de capilaridade. Além disso os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade das argamassas em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente menores coeficientes de capilaridade.

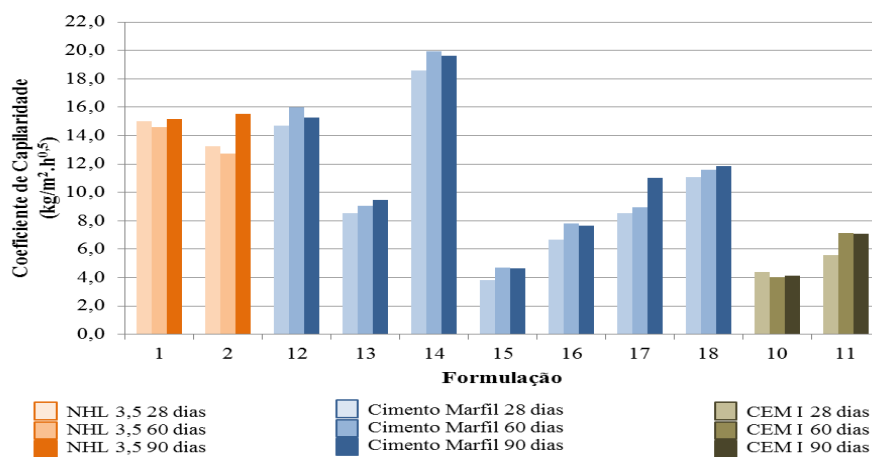


Figura 83. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Natural Marfil e CEM I

Analisando a Figura 83 verifica-se que as argamassas compostas por Cimento Natural Marfil apresentam valores de coeficiente de capilaridade compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural e para as argamassas de cimento Portland. No entanto este facto não se verifica para as argamassas 12 e 14, nas quais foi introduzida uma

percentagem de água de amassadura superior à necessária, aumentando a porosidade das mesmas e contribuindo para maiores coeficientes de capilaridade. Verifica-se assim que nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Marfil, a argamassa 14 apresenta maior capacidade de absorver água, podendo este resultado dever-se ao facto desta argamassa apresentar uma maior percentagem de água de amassadura, mas também apresentar um traço mais fraco, ou seja, maior quantidade de agregado e por isso maior facilidade em absorver água. Aos 90 dias esta argamassa apresenta um coeficiente de capilaridade de $19,60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$.

Tal como nas argamassas de Cimento Prompt Vicat, a introdução de cal aérea nas argamassas de Cimento Natural Marfil proporcionou a diminuição do coeficiente de capilaridade. No entanto, de um modo geral, verifica-se que as argamassas de Cimento Natural Marfil e cal aérea obtêm maiores valores de coeficiente de capilaridade nas formulações com traços mais ricos em cal aérea, apresentando a argamassa 18 o maior coeficiente de capilaridade ($11,85 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$). No entanto, tal como referido anteriormente, estes valores podem também ser influenciados pela quantidade de agregado que compõem as argamassas, verificando-se que quanto maior for a quantidade de areia, maiores serão os valores de coeficiente de capilaridade. Tal como referido para o Cimento Prompt Vicat, os valores obtidos podem estar também relacionados com a porosidade das argamassas em questão. Apesar de geralmente a introdução de cal aérea tornar as argamassas mais porosas, a sua introdução nestas argamassas pode ajudar na distribuição dos poros, promovendo possivelmente menores coeficientes de capilaridade.

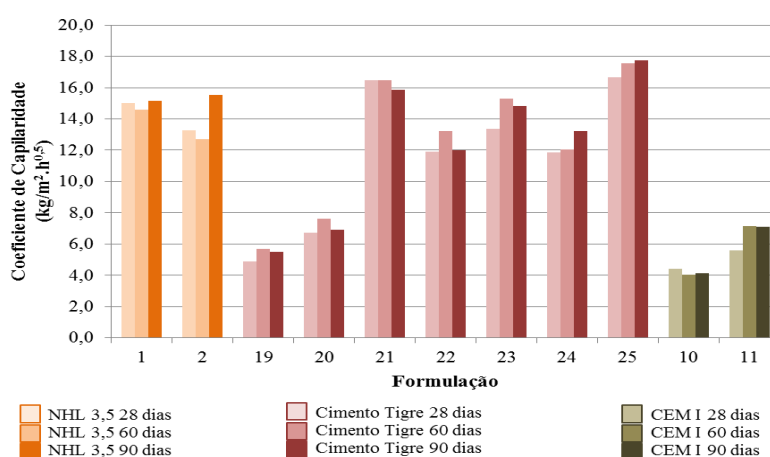


Figura 84. Resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Tigre e CEM I

De acordo com a Figura 84, as argamassas compostas por Cimento Natural Tigre apresentam na sua maioria valores de coeficiente de capilaridade compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural e para as argamassas de cimento Portland. No

entanto este facto não se verifica para as argamassas 21, 23 e 25, que revelam um coeficiente de capilaridade superior aos das argamassas de cal hidráulica natural.

Nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Tigre (argamassas 19, 20 e 21) o coeficiente de capilaridade é inversamente proporcional ao teor em cimento, verificando-se que a argamassa 21 é a que apresenta maior coeficiente de capilaridade ($15,88 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$). Este resultado pode dever-se ao facto de esta argamassa apresentar um traço mais fraco, ou seja, maior quantidade de agregado e por isso maior facilidade em absorver água.

Relativamente à introdução de cal aérea nas argamassas de Cimento Natural Tigre (argamassas 22, 23, 24 e 25), contrariamente ao que aconteceu nos restantes cimentos naturais, verificou-se um aumento no coeficiente de capilaridade. Verifica-se também que as argamassas de Cimento Natural Tigre e cal aérea obtêm maiores valores de coeficiente de capilaridade nas formulações com traços mais ricos em cal aérea, apresentando a argamassa 25 o maior coeficiente de capilaridade ($17,76 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$). No entanto, tal como referido anteriormente, estes valores podem ser influenciados pela quantidade de agregado que compõem as argamassas, verificando-se que quanto maior for a quantidade de areia, maiores serão os valores de coeficiente de capilaridade.

Considerando os valores obtidos para os restantes cimentos, verifica-se que as argamassas de Cimento Natural Tigre apresentam um comportamento distinto das restantes argamassas, observando-se um aumento dos coeficientes de capilaridade com a adição de cal aérea. Além da influência da quantidade de agregado, os valores obtidos para a capilaridade podem também estar relacionados com a diferente composição química e mineralógica deste cimento e com a porosidade. Considerando as argamassas de Cimento Natural Tigre menos porosas e mais densas, a introdução de cal aérea nestas argamassas pode alterar a distribuição dos poros, tornando-as mais porosas e promovendo maiores coeficientes de capilaridade. Esta análise está de acordo com os resultados de microscopia eletrónica de varrimento, onde a argamassa de Cimento Natural Tigre é considerada com uma morfologia mais densa, com uma maior concentração de partículas e possivelmente com uma menor porosidade.

7.3.6.2. Influência da introdução de cinzas de cortiça

Relativamente à introdução de cinzas de cortiça nas argamassas de cimento natural, os resultados obtidos para os coeficientes de capilaridade podem ser analisados na Figura 85.

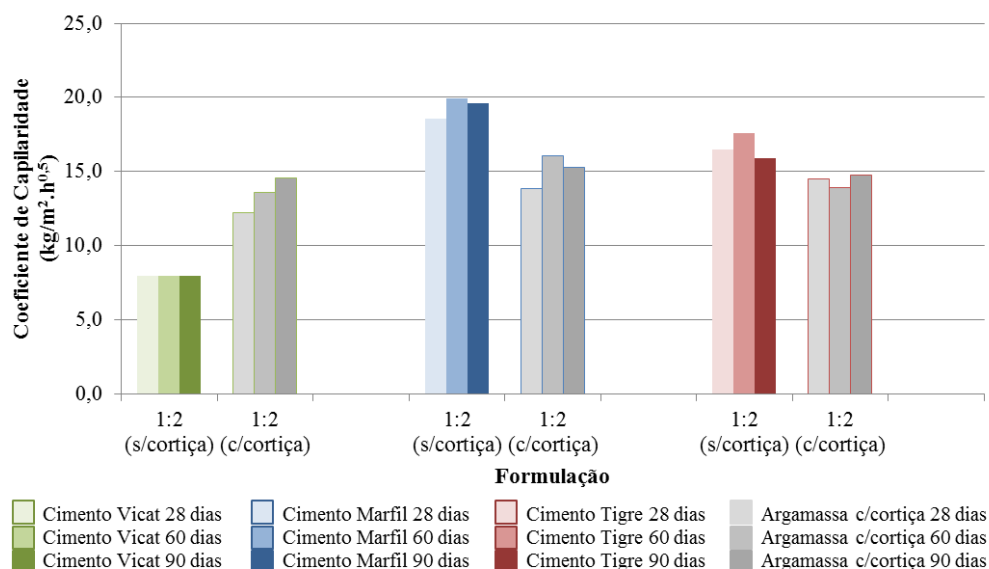


Figura 85. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de cimento natural e das argamassas de cimento natural com incorporação de cinzas de cortiça

No caso da argamassa de Cimento Prompt Vicat, a adição de cinzas de cortiça alterou drasticamente o coeficiente de capilaridade, que aumentou de $7,96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para $14,59 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$. Pelo contrário, a introdução de cinzas de cortiça na argamassa de Cimento Natural Tigre alterou ligeiramente o coeficiente de capilaridade, que diminuiu de $15,88 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para $14,80 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$.

Relativamente à argamassa de Cimento Natural Marfil, a influência da incorporação de cinzas de cortiça torna-se mais complexa, tendo-se alterado o coeficiente de capilaridade, que diminuiu de $19,60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para $15,26 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$. No entanto é de salientar que a argamassa sem incorporação de cortiça (argamassa 14) apresenta uma percentagem de água de amassadura superior à necessária, conduzindo a uma argamassa mais porosa e consequentemente com um coeficiente de capilaridade superior ao suposto.

Analisando os resultados anteriormente descritos, é possível verificar que a introdução de cinzas de cortiça influenciou de forma distinta a capilaridade das argamassas em estudo. Tal como referido anteriormente, os valores obtidos para o coeficiente de capilaridade podem ser também influenciados pela porosidade das argamassas em questão.

7.3.6.3. Influência da introdução de retardador de presa

Relativamente à introdução de retardador de presa Plastiment VZ da Sika nas argamassas de cimento natural, os resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade podem ser analisados nas Figuras 86 e 87.

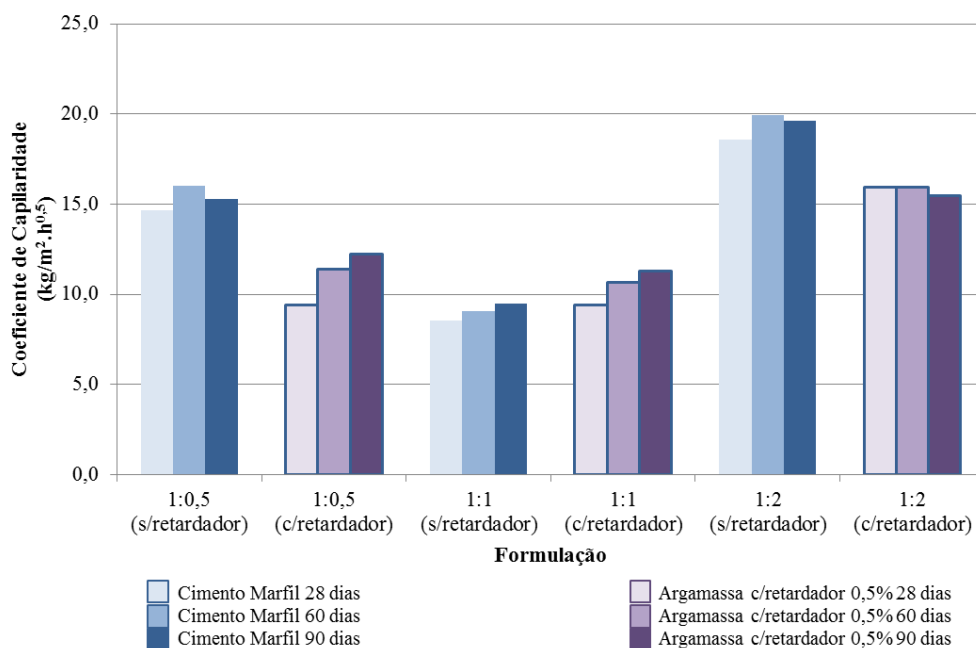


Figura 86. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de Cimento Natural Marfil e das argamassas de Cimento Natural Marfil com retardador

Na Figura 86 encontram-se representadas as argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Marfil, podendo ser comparados os seus coeficientes de capilaridade, consoante a utilização ou não de retardador de presa.

A adição de retardador de presa originou uma diminuição dos coeficientes de capilaridade nas argamassas com formulações 1:0,5 e 1:2 (argamassas 12 e 14), diminuindo de 15,29 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para 12,25 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ no caso da argamassa com formulação 1:0,5 e de 19,60 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para 15,45 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ no caso da argamassa com formulação 1:2. No entanto é de referir que às argamassas sem adição de retardador de presa foram adicionadas percentagens de água de amassadura ligeiramente superiores às necessárias, que por consequência conduziram a maiores coeficientes de capilaridade. Posteriormente, no momento de amassadura das argamassas com a mesma formulação e adição de retardador de presa, as percentagens de água foram ajustadas.

Por sua vez, na argamassa com formulação 1:1 (argamassa 13) verifica-se que o coeficiente de capilaridade se alterou ligeiramente com a introdução de retardador de presa, aumentando de $9,47 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ para $11,27 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$.

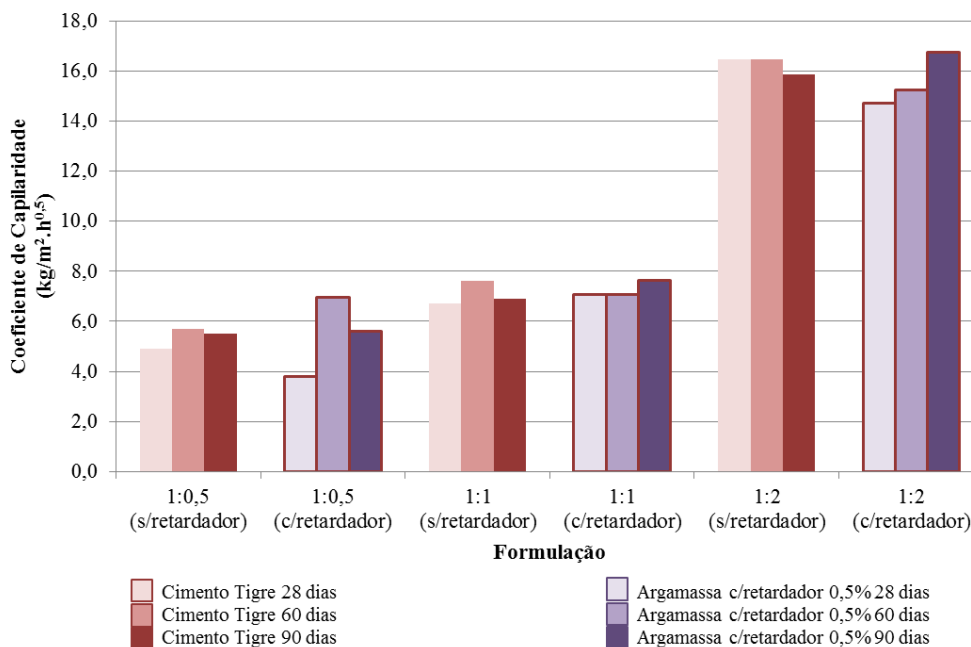


Figura 87. Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade das argamassas de Cimento Natural Tigre e das argamassas de Cimento Natural Tigre com retardador

Analisando a Figura 87 é possível comparar os coeficientes de capilaridade das argamassas cujo ligante é unicamente o Cimento Natural Tigre, consoante a utilização ou não de retardador de presa. No entanto, em nenhuma das formulações a introdução de retardador de presa originou alterações significativas no coeficiente de capilaridade.

7.3.7. Análise da permeabilidade ao vapor de água

A saída de vapor de água é avaliada pela permeabilidade ao vapor de água, definindo-se esta característica como o fluxo de vapor que atravessa a argamassa, em condições de equilíbrio, por unidade de superfície e pressão de vapor (EMO, 2011). Esta propriedade é expressa pelo coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (μ), valor característico dos materiais, que é obtido pela relação adimensional entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material.

Na Tabela 11 encontram-se representadas as formulações realizadas e os respetivos valores da permeabilidade ao vapor e da resistência à difusão de vapor de água. Os mesmos resultados encontram-se na Tabela A.III. 2, uma tabela comparativa que se encontra no Anexo III.

Tabela 11. Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade ao vapor

Argamassa	Permeabilidade ao vapor de água, W_{pv} ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)	Coefficiente de resistência à difusão de vapor de água, μ
1	1,64E-11	11,85
2	1,61E-11	12,01
3	1,37E-11	14,12
4	1,33E-11	14,57
5	1,27E-11	15,32
6	1,30E-11	14,89
7	1,24E-11	15,67
8	1,25E-11	15,47
9	1,26E-11	15,41
10	8,25E-12	23,50
11	7,97E-12	24,33
12	1,35E-11	14,36
13	1,33E-11	14,61
14	1,32E-11	14,66
15	1,26E-11	15,36
16	1,23E-11	16,73
17	1,35E-11	15,14
18	1,28E-11	16,41
19	6,98E-12	27,78
20	6,90E-12	28,10
21	6,02E-12	32,24
22	6,82E-12	28,46
23	6,56E-12	29,55
24	6,61E-12	29,34
25	6,44E-12	30,11

Na análise deste ensaio e de acordo com a EN 998-1, a permeabilidade ao vapor de água é expressa em termos do coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (μ).

Considerando os valores obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água representados na Tabela 11, é possível verificar que as argamassas compostas por cal hidráulica natural e cimento Portland apresentam respetivamente os valores mais baixos e mais elevados, encontrando-se os valores relativos aos cimentos naturais, compreendidos entre os referidos anteriormente. Este facto não se verifica para as argamassas de Cimento Natural

Tigre, que apresentam valores de resistência à difusão de vapor de água superiores aos valores referentes às argamassas de cimento Portland.

É importante salientar que a introdução de cal aérea nas argamassas de cal hidráulica natural e nas argamassas de cimento Portland não alterou de forma significativa o comportamento das argamassas com estes tipos de ligantes. A argamassa composta por cal hidráulica natural (argamassa 1) revelou um coeficiente de resistência à difusão de vapor de água com valor 11,85, aumentando este para 12,01 na argamassa de cal hidráulica natural com cal aérea (argamassa 2). Por sua vez, a argamassa composta por cimento Portland (argamassa 10) revelou um coeficiente de resistência à difusão de vapor de água com valor 23,50, aumentando este para 24,33 na argamassa de cimento Portland com cal aérea (argamassa 11).

Estes factos podem ser verificados analisando as Figuras 88, 89 e 90, onde os valores obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas de cal hidráulica natural e de cimento Portland são comparados com os valores obtidos para as argamassas dos restantes cimentos.

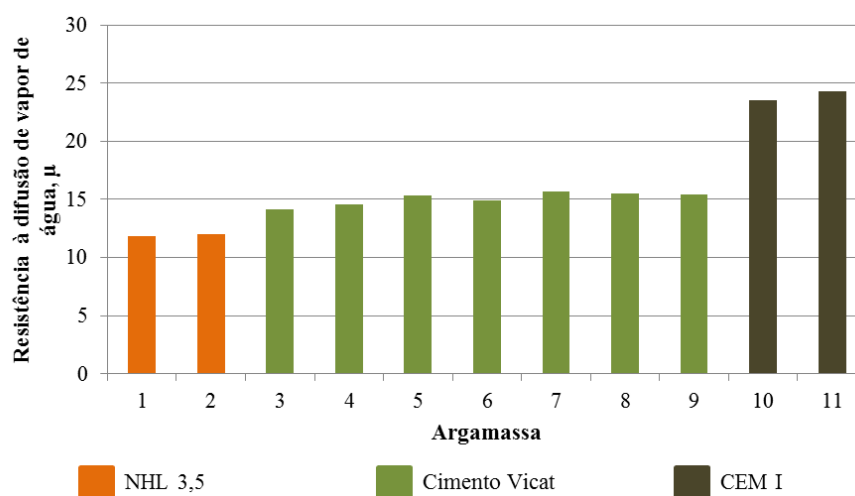


Figura 88. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Prompt Vicat e CEM I

Analisando a Figura 88 é possível verificar que as argamassas compostas por Cimento Prompt Vicat apresentam valores de coeficiente de resistência à difusão de vapor de água compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural e para as argamassas de cimento Portland. Este facto é visível por exemplo no caso das argamassas 1, 5 e 10, em que as três argamassas apresentam o mesmo traço. No fim do ensaio a argamassa 1 apresenta o menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (11,85) e a argamassa

10 apresenta o maior coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (23,50), encontrando-se o valor correspondente à argamassa 5 (15,32) compreendido entre os referidos anteriormente.

É também possível verificar que nas argamassas compostas unicamente por Cimento Prompt Vicat, o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água é inversamente proporcional ao teor em cimento. Por exemplo, considerando as argamassas 3, 4 e 5, constata-se que a amostra 3 apresenta menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (14,12). Este facto talvez esteja associado à percentagem de água de amassadura. A argamassa 3 apresenta maior percentagem de água de amassadura, originando possivelmente uma maior porosidade e consequentemente um menor coeficiente de resistência à difusão do vapor de água, ou seja, uma maior difusão do vapor de água (maior permeabilidade).

Relativamente à introdução de cal aérea nas argamassas de Cimento Prompt Vicat, esta proporcionou um ligeiro aumento nos coeficientes de resistência à difusão de vapor de água, não sendo este aumento significativo.

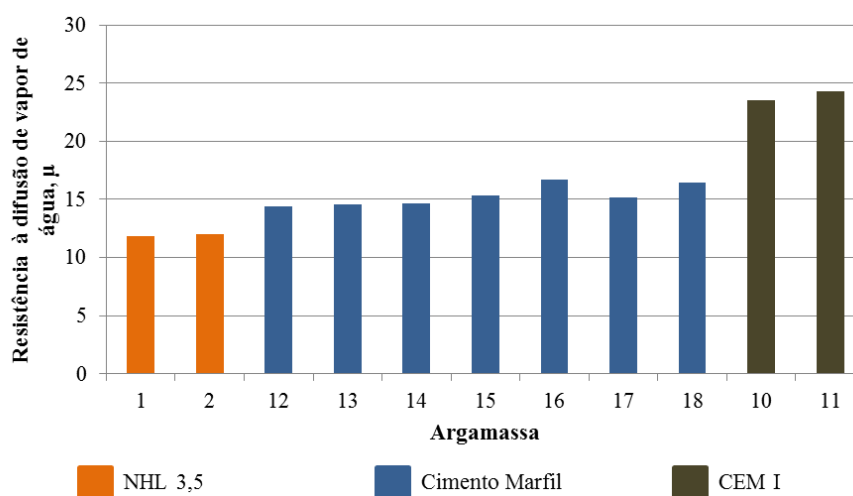


Figura 89. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3.5, Cimento Natural Marfil e CEM I

Analisando a Figura 89 verifica-se que as argamassas compostas por Cimento Natural Marfil apresentam valores de coeficiente de resistência à difusão de vapor de água compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural e para as argamassas de cimento Portland. Este facto é visível por exemplo no caso das argamassas 1, 14 e 10, em que as três argamassas apresentam o mesmo traço. No fim do ensaio a argamassa 1 apresenta o menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (11,85) e a argamassa 10 apresenta

o maior coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (23,50), encontrando-se o valor correspondente à argamassa 14 (14,66) compreendido entre os referidos anteriormente.

É também possível verificar que nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Marfil, o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água é inversamente proporcional ao teor em cimento. Por exemplo, considerando as argamassas 12, 13 e 14, constata-se que a amostra 12 apresenta menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (14,36). Este facto talvez esteja associado à percentagem de água de amassadura. A argamassa 12 apresenta maior percentagem de água de amassadura, originando possivelmente uma maior porosidade e consequentemente um menor coeficiente de resistência à difusão do vapor de água.

Relativamente às argamassas bastardas com cal aérea, estas apresentam um ligeiro aumento, não significativo, no coeficiente de resistência à difusão de vapor de água.

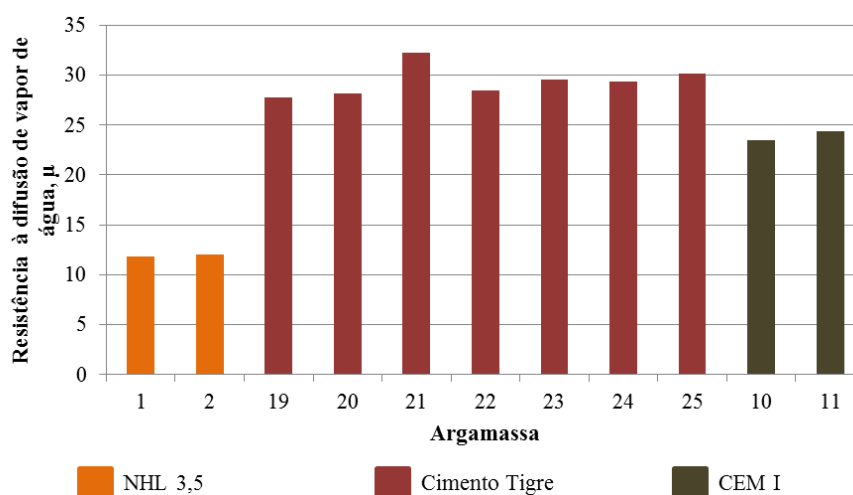


Figura 90. Resultados obtidos para o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas compostas por NHL 3,5, Cimento Natural Tigre e CEM I

Analisando a Figura 90 é possível verificar que contrariamente ao que se verifica com os restantes cimentos naturais, os valores relativos às argamassas compostas por Cimento Natural Tigre não se encontram compreendidos entre os valores obtidos para as argamassas de cal hidráulica natural e para as argamassas de cimento Portland. Todas as argamassas de Cimento Natural Tigre apresentarem valores de resistência à difusão de vapor de água bastante superiores ao esperado, sendo superiores aos obtidos para o cimento Portland. Este facto deve-se à diferente composição química e mineralógica deste cimento, sendo também de considerar que as argamassas de Cimento Natural Tigre possivelmente serão mais densas e menos porosas, proporcionando maiores coeficientes de resistência à difusão de vapor de água que

conduzem a uma menor difusão do vapor de água, ou seja, a uma menor permeabilidade ao vapor de água.

Este ensaio corrobora os ensaios referidos anteriormente, em que é mencionado que os resultados obtidos estão intimamente relacionados com a estrutura porosa do próprio material.

É também possível verificar que nas argamassas compostas unicamente por Cimento Natural Tigre, o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água é inversamente proporcional à sua riqueza em cimento. A argamassa 19 apresenta menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (27,78), podendo estar este facto relacionado com a percentagem de água de amassadura. Esta argamassa apresenta a maior percentagem de água de amassadura, originando possivelmente uma maior porosidade e um menor coeficiente de resistência à difusão de vapor de água. Esta análise vai de encontro aos resultados obtidos no ensaio de SEM, de onde se concluiu que a argamassa de Cimento Natural Tigre apresenta uma morfologia mais densa e menos porosa.

Considerando as argamassas em que foi introduzida cal aérea, estas apresentam um ligeiro aumento no coeficiente de resistência à difusão de vapor de água. No entanto este aumento não se revela significativo.

Capítulo 8

Conclusões

8. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo a caracterização de argamassas de cimento romano utilizadas em edifícios do início do século XX, desenvolvendo composições de argamassas passíveis de serem utilizadas na conservação e reabilitação. Para além da formulação de argamassas, teve-se também como objetivo prosseguir estudos previamente realizados, tentando colmatar a falta de informação existente sobre estes revestimentos.

Para o desenvolvimento das argamassas de substituição optou-se por dar importância à compatibilidade, considerando diferentes formulações e três cimentos naturais de marcas comerciais distintas. A título de curiosidade, optou-se por introduzir em algumas delas, cinzas de cortiça e retardador de presa.

Os ensaios realizados em laboratório facultaram as informações necessárias para a compreensão das argamassas de cimento romano, provando que de uma forma geral o comportamento deste ligante pode ser colocado entre o comportamento da cal hidráulica e do cimento Portland. Os mesmos testes laboratoriais provaram também que a composição química e mineralógica, a estrutura microscópica e a porosidade dos cimentos naturais são importantes fatores diferenciadores no comportamento das argamassas que os incluem.

Durante a análise dos ensaios realizados foi possível observar uma tendência generalizada para as argamassas de Cimento Natural Tigre apresentarem um comportamento distinto das argamassas compostas pelos restantes cimentos naturais. Na realidade, o Cimento Natural Tigre é de facto diferente dos restantes, destacando-se por apresentar algumas diferenças a nível químico e mineralógico, quando comparado com os restantes cimentos. Considerando também os resultados obtidos na análise de microscopia eletrónica de varrimento, constatou-se que as argamassas de Cimento Natural Tigre apresentam uma morfologia mais densa que as restantes e possivelmente uma menor porosidade.

Ao analisar as características mecânicas, destacam-se as elevadas resistências à compressão e à flexão adquiridas logo nas primeiras idades. Neste sentido, salientam-se as argamassas bastardas com formulação 0,75:0,25:1. No entanto, as argamassas de Cimento Natural Tigre revelaram melhores comportamentos sem a adição de cal aérea, salientando-se a argamassa com formulação 1:0,5.

É de referir a rápida carbonatação que se verificou nas argamassas de cimento romano, salientando-se que nas formulações sem adição de cal aérea a reação de carbonatação está finalizada logo nas primeiras idades. No entanto, nas argamassas de Cimento Natural Tigre isto não se verificou.

O trabalho efetuado permitiu também obter algumas informações sobre o comportamento destas argamassas face à água. Verificaram-se assim elevados valores de absorção de água por capilaridade, sendo indiscutível que esta é uma grande desvantagem destas argamassas. As argamassas em estudo apresentaram valores de capilaridade mais elevados quando estas são compostas unicamente por cimento natural. No entanto, as argamassas de Cimento Natural Tigre revelaram valores de capilaridade mais elevados em argamassas com adição de cal aérea.

Tal como esperado, as argamassas de cimento romano apresentam baixas resistências à difusão de vapor de água, ou seja, elevada permeabilidade. No entanto, as argamassas de Cimento Natural Tigre, mais resistentes e densas, revelaram menor permeabilidade ao vapor de água.

Devido à sua rápida presa, os cimentos romanos revelaram-se difíceis de trabalhar, sendo necessárias grandes quantidades de água para que fosse atingida uma boa trabalhabilidade. Neste sentido, as cinzas de cortiça e o retardador de presa revelaram aspetos positivos nas formulações em que foram incorporados, sendo necessárias menores quantidades de água de amassadura e retardando a presa, não alterando as resistências mecânicas.

O presente trabalho permitiu confirmar as potencialidades do cimento romano, revelando-se uma mais-valia na conservação de edifícios históricos com revestimentos baseados neste cimento. Apesar de atualmente serem poucas as empresas que produzem cimento romano, a sua comercialização pode tornar-se uma oportunidade à medida que edifícios construídos com recurso a argamassas com este ligante venham a necessitar de intervenção.

No entanto este cimento é ainda considerado por muitos como um ligante em desuso, motivo pelo qual deve continuar a ser estudado. Assim, antevendo trabalhos futuros, sugere-se a realização de alguns ensaios complementares, como por exemplo o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e o ensaio de aderência por arrancamento.

Seria também relevante a continuação do atual estudo, realizando os ensaios efetuado aos 180 dias, 1 ano e 2 anos, uma vez que este cimento revela um ganho de resistência ao longo de meses e anos. Numa tentativa de melhorar as características destas argamassas, seria interessante estudar novas formulações, com variação das percentagens de aditivos empregues.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASPIAZU, L., CEMENTOS URIARTE ZUBIMENDI, SA. (1924). *Inalterables por las aguas del mar y por las seleniotosas*. Zumaya, Guipuzcoa, Espanha.
- BOLAS, I. (2011). *As novas tecnologias do cimento e a materialização do Corporativismo Português*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- CARDEIRA, A. (2010). *Análise macroscópica do efeito de dois modificadores de cristalização com baixa toxicidade*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- CARVALHO, J. (2008). Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. *Revista Tecnológica*, 17: 19-28.
- EMO (2001). *EMOdicó - Dicionário Técnico*. European Mortar Industry Organization. 3ª Edição.
- EN 1015-2 (1998). *Methods of test for mortar for masonry Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*, CEN.
- EN 1015-3 (1999). *Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar*, CEN.
- EN 1015-6 (1998). *Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, CEN.
- EN 1015-11 (1999). *Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, CEN.
- EN 1015-18 (2002). *Methods of test for mortar for masonry Part 18: Determination of water-absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, CEN.
- EN 196-1 (2005). *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*, CEN.

- FONTES, T. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional. Optimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- GOSSELIN, C., VERGES-BELMIN, V., ROYER, A., MARTINET, G. (2008). Natural cement and monumental restoration. *Materials and Structures*, 42: 749-763.
- GURTNER, C., HILBERT, G., HUGHES, D., KOZLOWSKI, R., WEBER, J. (2012). *Manual on best practice in the application of Roman cements*. EU-project ROCARE - Roman cement for architectural restoration to new high standards.
- HUGHES, D. C., SUGDEN, D.B., JAGLIN, D., MUCHA, D. (2007). Calcination of Roman Cement: A pilot study using cement-stones from Whitby. *Construction and Building Materials*, 22: 1446-1455.
- KLISINSKA-KOPACZ, A., TISLOVA, R. (2012). Effect of hydrophobization treatment on the hydration of repair Roman cement mortars. *Construction and Building Materials*, 35: 735-740.
- KLISINSKA-KOPACZ, A., TISLOVA, R., ADAMSKI, G., KOZLOWSKI, R. (2010). Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility. *Journal of Cultural Heritage*, 11(4): 404-410.
- KOLLER, M. (2012). *Nineteenth Century Architectural Heritage in Europe*. Conference internationale ICOMOS-France/ROCARE, Paris, França.
- KOZLOWSKI, R. (2012). *Restoration of façades based on the Roman cement technology*. ROCARE Info-Day Freiburg, Freiburg, Alemanha.
- KOZLOWSKI, R., HUGHES, D., WEBER, J. (2010). *Roman cements - key materials of the built heritage of the nineteenth century. Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer.
- LEITE, J. (2013). Teatro Nacional São João. Restos de Coleção. Disponível em: <http://restosdecoleccion.blogspot.pt/2013/10/teatro-nacional-sao-joao.html>. Acesso em : 05/11/2014.

- MALINOWSKI, R. (1979). Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International*, 1: 66-76.
- MARGALHA, M. (2011). *Argamassas*. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património. Universidade de Évora, Évora.
- MARTINS, J. G., ASSUNÇÃO, J.S. (2004). *Materiais de construção: argamassas e rebocos*. Série Materiais, 1ª Edição. Universidade Fernando Pessoa, Porto.
- NEVES, P. (1894). Estudos sobre cimentos estrangeiros importados em Portugal. Internet Archive, Notas sobre Portugal, Revista de Obras Publicas e Minas. Disponível em: http://archive.org/stream/notassobreportu01arrogoo/notassobreportu01arrogoo_djvu.txt. Acesso em: 28/10/2014.
- NP EN 1015-19 (2000). *Métodos de ensaio de argamassas para Alvenaria Parte 19: Determinação de permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*, CEN.
- OLIVEIRA, G. B. (1999). *A Indústria Portuguesa do Cimento. Um Século de História 1890-1990*. Volume I. CIMPOR Cimentos de Portugal, S.A., Lisboa.
- PALACIOS, M.; SIERRA, C.; PUERTAS, F. (2003). Métodos y técnicas de caracterización de aditivos para el hormigón. *Materiales de Construcción*, 53: 89-106.
- PÁSCOA, L. (2012). *Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- PEREIRA, T. A. (2008). *Otimização das características de humedecimento e secagem de argamassas*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- PINTÉR, F., VIDOVSZKY, I., WEBER, J., BAYER, K. (2013). Mineralogical and microstructural characteristics of historic Roman cement renders from Budapest, Hungary. *Journal of Cultural Heritage*, 15: 219-226.
- POMBO, A. (2007). *A “Indústria Social” da Fábrica de Maceira-Liz: Política social e operariado na indústria do cimento em Maceira*. Museu da Fábrica Maceira-Liz, Maceira.

- RODRIGUES, M. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Dissertação para obtenção de grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- ROSELANDE NATURAL CEMENT PRODUCTS. Why use Rosendale Natural Cement Products? Authenticity, Compatibility, Sustainability and Economy. Disponível em: http://www.rosendalecement.net/WHY_USE_AUTHENTIC_ROSENDALE_NATURAL_CEMENT_PRODUCTS.pdf. Acesso em: 20/10/2014.
- ROCARE. Roman Cements for Architectural Restoration to New High Standards. Disponível em: <http://www.rocare.eu/page/start.html>. Acesso em: 20/10/2014.
- SANTOS, S. (2009). *Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios recentes*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Militar. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- SECIL. Factos Históricos. Disponível em: <http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico>. Acesso em: 28/10/2014.
- SENCADAS, V. (2005). *Influência das condições de processamento na morfologia e fases cristalinas do PVDF e nas transições de fase do copolímero P(VDF-TrFE)*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.
- SMITH, W.F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 3ª Edição. McGraw-Hill de Portugal Lda, Amadora.
- VARAS, M. J., ALVAREZ DE BUERGO, M., FORT, R. (2005). Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research*, 35: 2055-2065.
- VARELA, N., VIEIRA, F.S. (2005). *Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. APFAC, Lisboa.
- VEIGA, M. R. (2001). Revestimentos de paredes: funções e exigências. *Arquitectura e Vida*, 12: 74-80.

- VITRÚVIO (2006). *Tratado de Architectura* (tradução do latim, introdução e notas por M. Justino Maciel). I.S.T. Press, Lisboa.
- WALSH, J. (2008). Petrography: Distinguishing Natural Cement from Other Binders in Historical Masonry Construction Using Forensic Microscopy Techniques. *Journal of ASTM International*, 4(1): 20-31.
- WILK, D., BRATASZ, L., KOZLOWSKI, R. (2013). Shrinkage cracking in Roman cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 53: 168-175.

Anexos

ANEXO I

Análise de difração de raios-X (DRX) em amostras de Cimento Natural Marfil

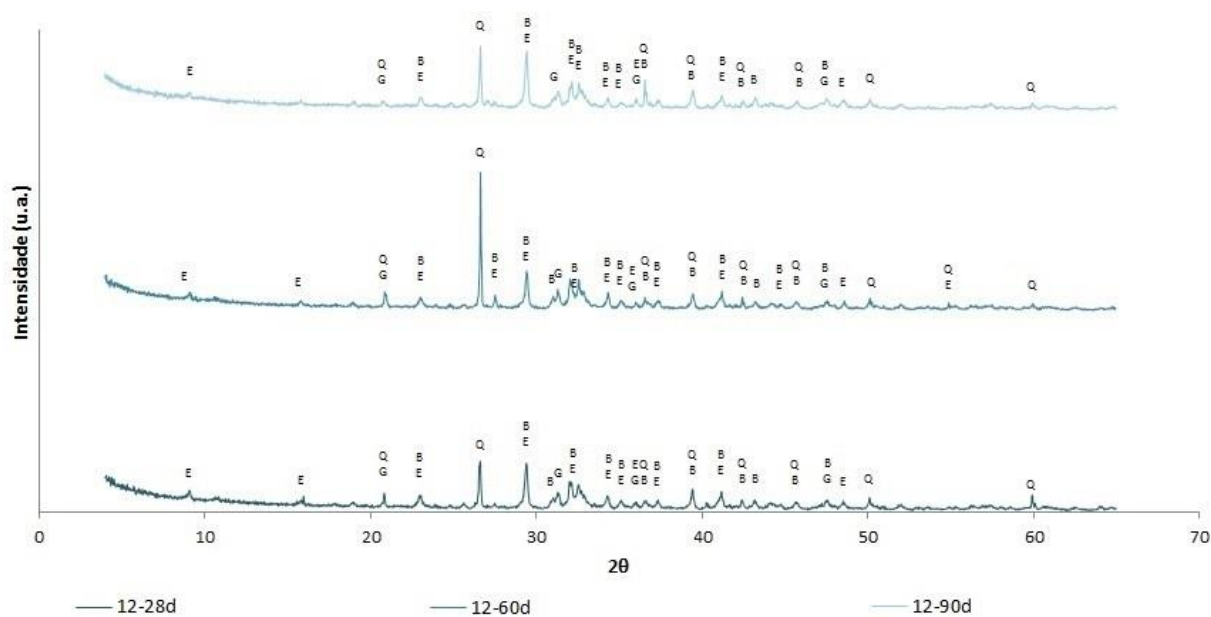


Figura A.I. 1. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 12
Q – Quartzo G – Gesso B – Belite E – Etringite

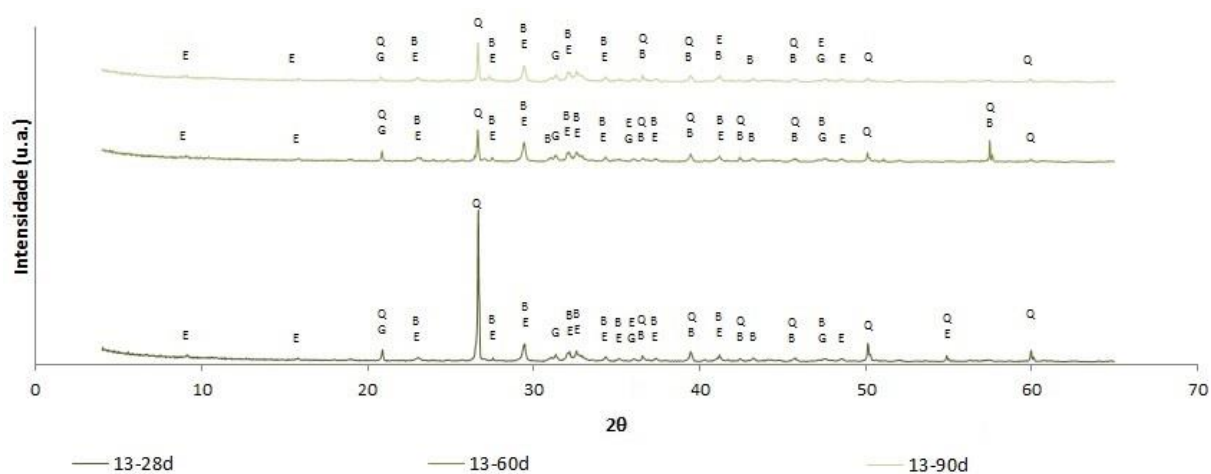


Figura A.I. 2. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 13
Q – Quartzo G – Gesso B – Belite E – Etringite

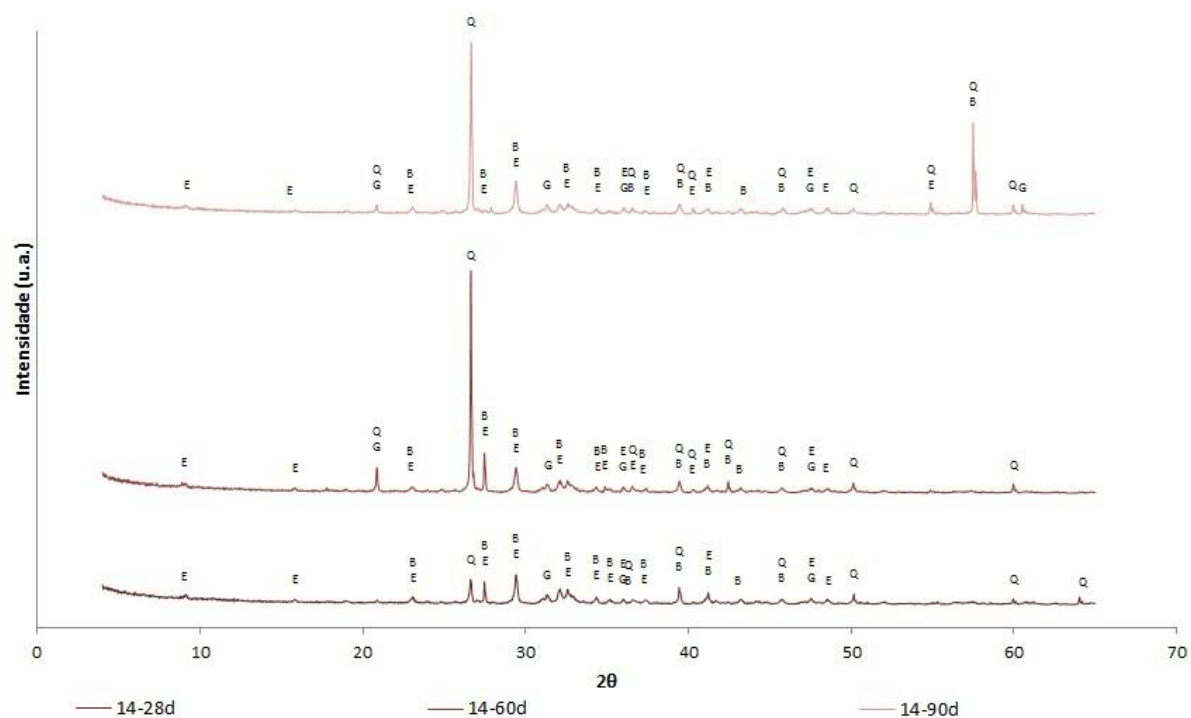


Figura A.I. 3. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 14
Q – Quartzo G – Gesso B – Belite E – Etringite

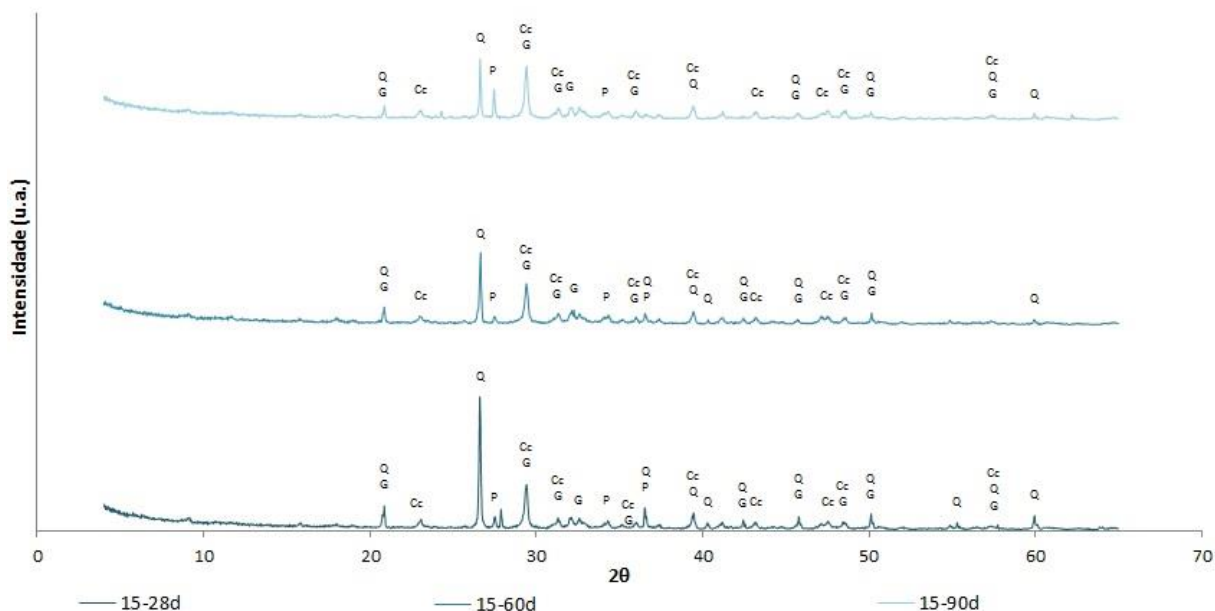


Figura A.I. 4. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 15
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

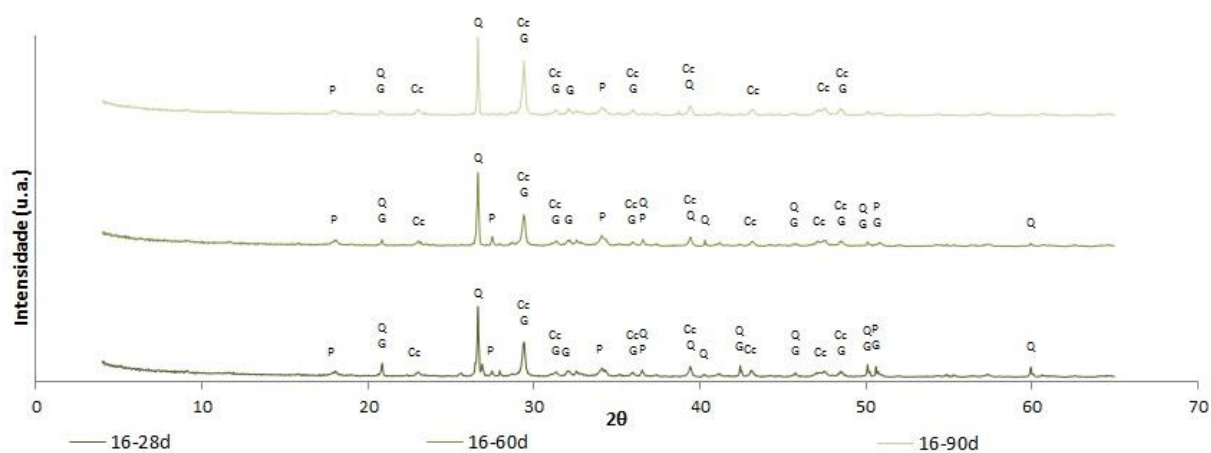


Figura A.I. 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 16
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

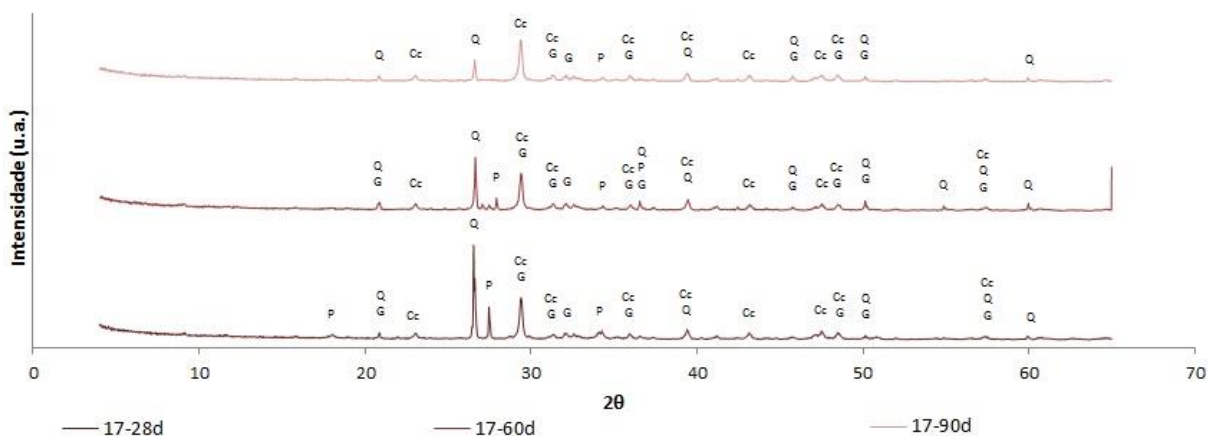


Figura A.I. 6. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 17
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

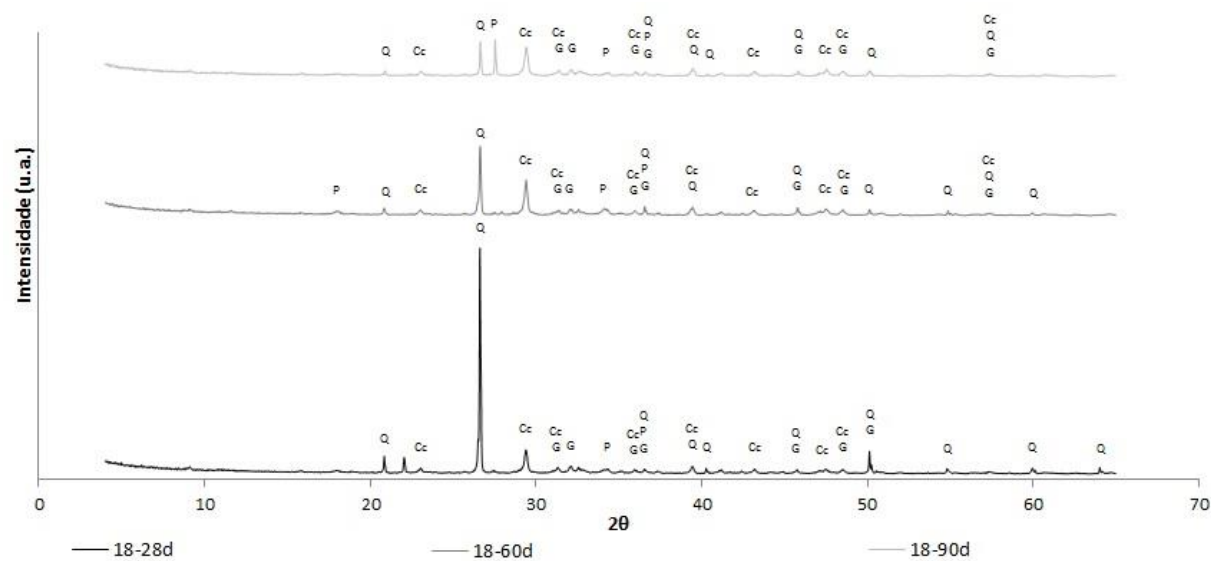


Figura A.I. 7. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 18
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

ANEXO II

Análise de difração de raios-X (DRX) em amostras de Cimento Natural Rápido Tigre

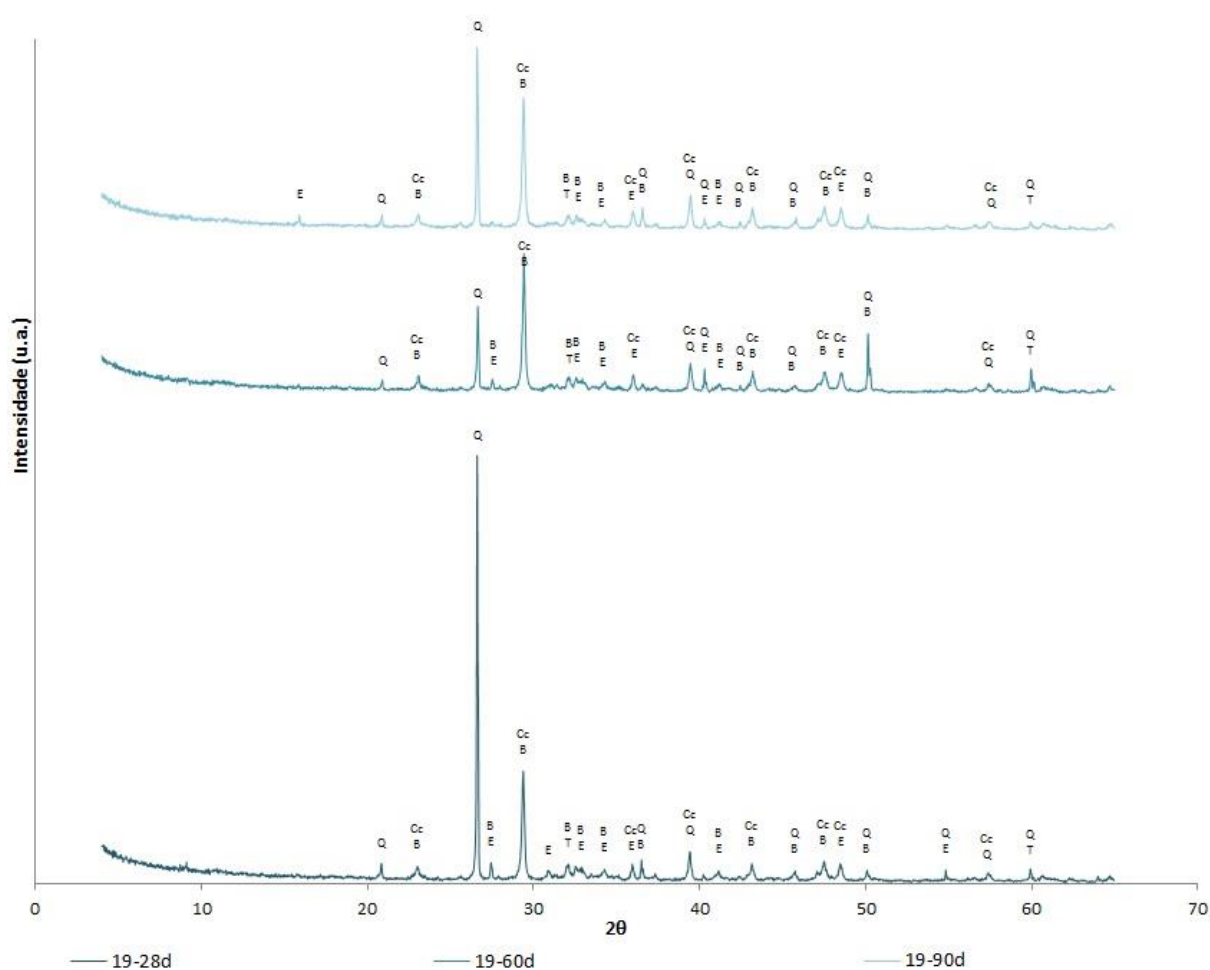


Figura A.II. 1. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 19
 Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite E – Etringite T – Ternardite

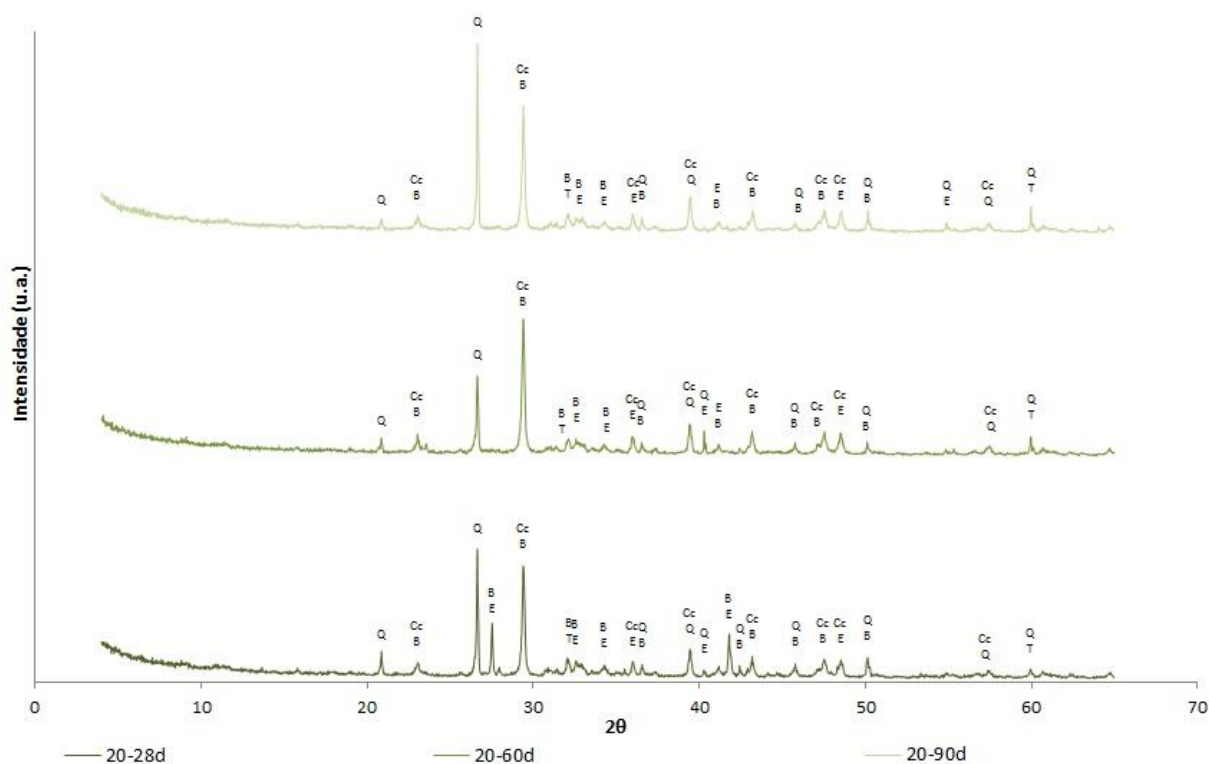


Figura A.II. 2. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 20
Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite E – Etringite T – Ternardite

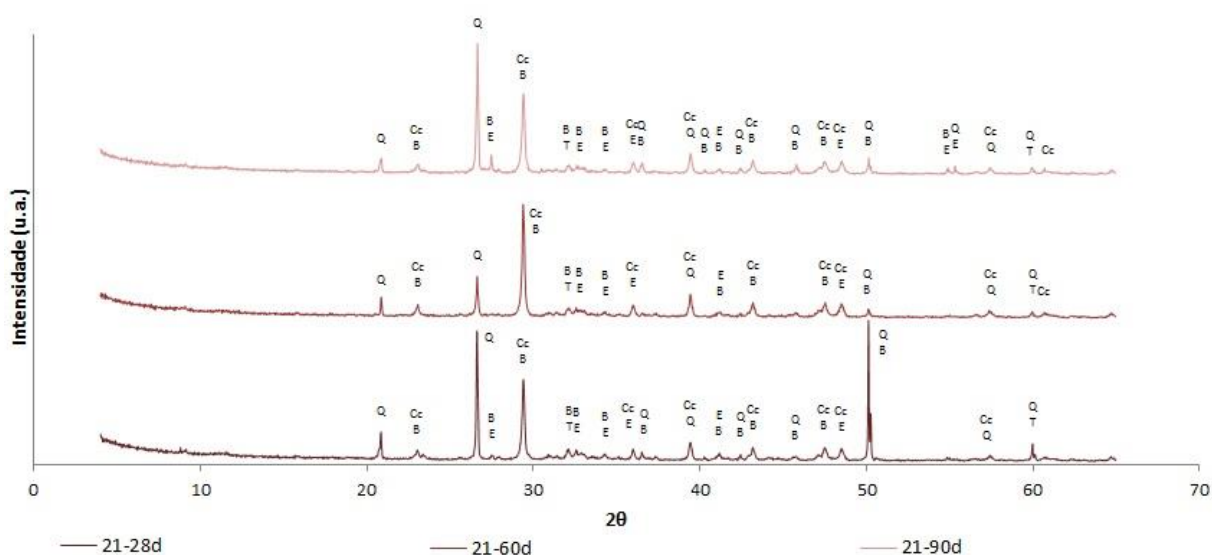


Figura A.II. 3. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 21
Q – Quartzo Cc – Calcite B – Belite E – Etringite T – Ternardite

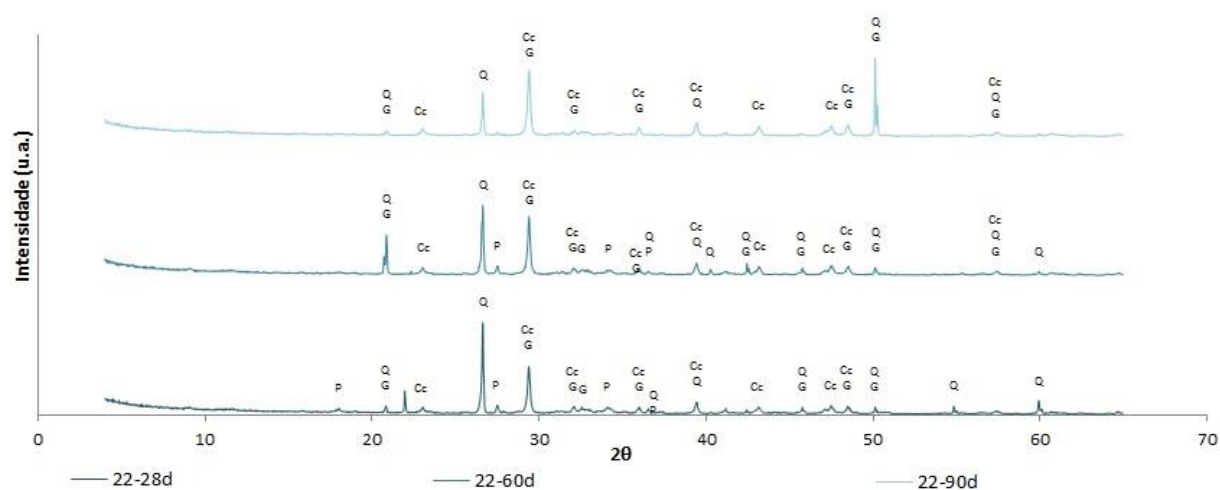


Figura A.II. 4. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 22
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

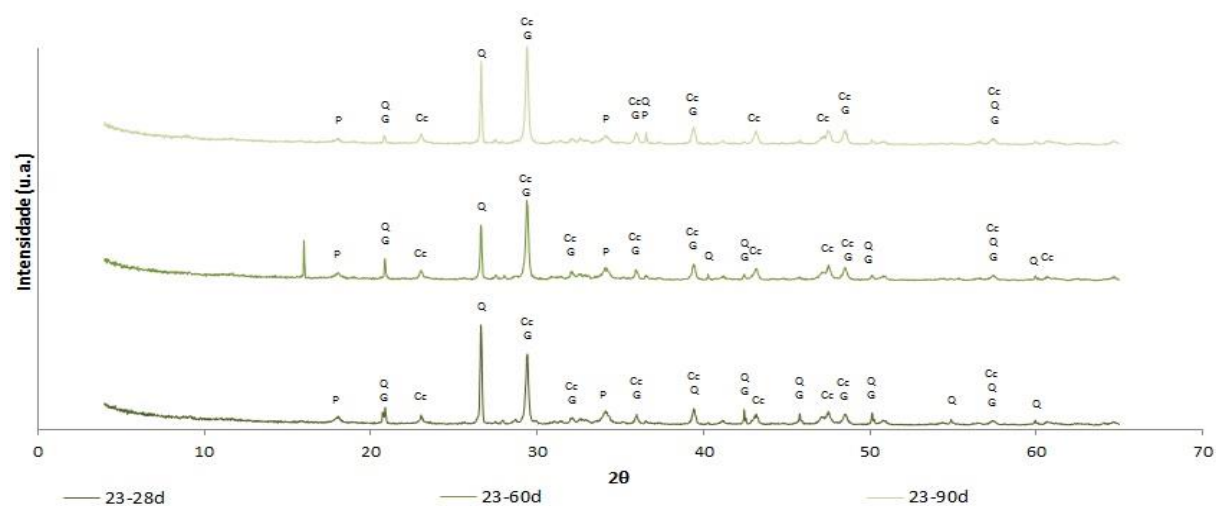


Figura A.II. 5. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 23
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

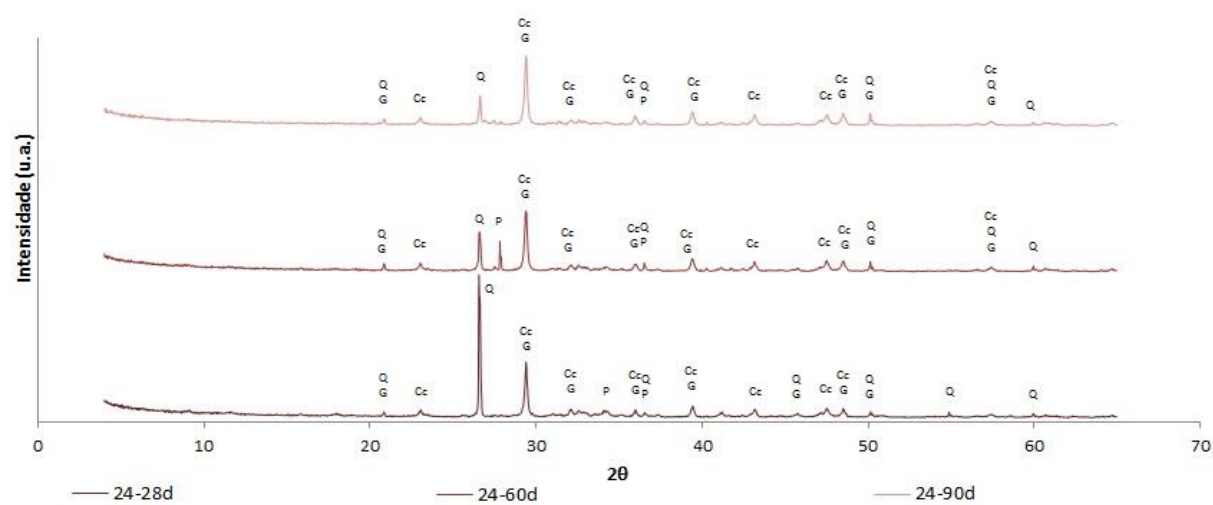


Figura A.II. 6. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 24
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

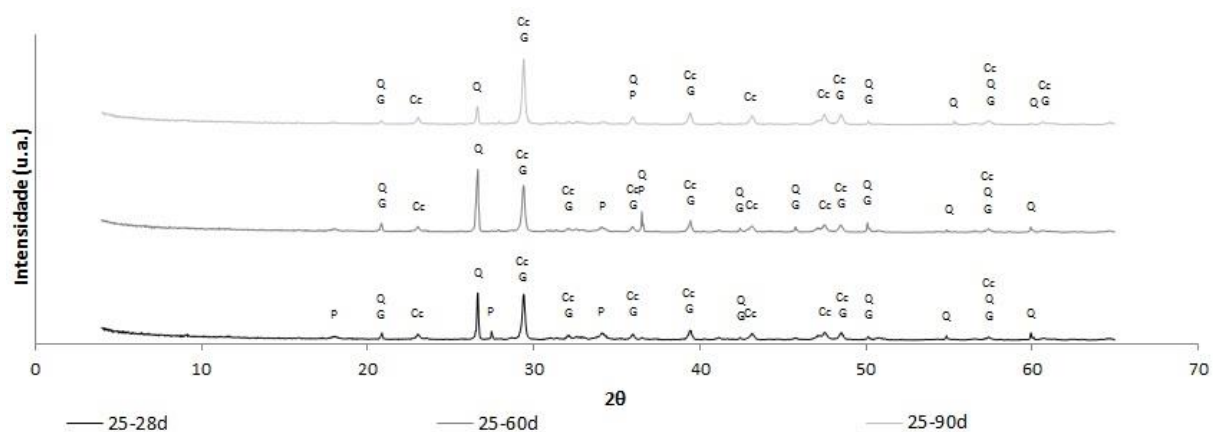


Figura A.II. 7. Resultados obtidos na análise de difração de raios-X (DRX) em amostra da argamassa 25
Q – Quartzo G – Gesso Cc – Calcite P – Portlandite

ANEXO III

Tabela comparativa final I

Tabela A.III. 1. Resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão, resistência à compressão e profundidade de carbonatação

Argamassa	Traço Volumétrico	Máx. Tensão Flexão (MPa)			Máx. Tensão Compressão (MPa)			Profundidade de Carbonatação (mm)		
		28 dias	60 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias
1	1:2	0,48	0,34	0,48	1,06	0,64	1,23	2,1	6,9	7,5
2	0,5:0,5:2	0,41	0,47	0,67	0,72	0,59	1,60	3,5	7,3	8,5
3	1:0,5	1,40	0,99	1,26	9,02	8,04	7,93	4	Reação completa	Reação completa
4	1:1	1,15	0,94	0,92	5,44	4,65	4,46	4,5	Reação completa	Reação completa
5	1:2	0,72	0,71	0,70	1,96	1,94	1,73	10,5	Reação completa	Reação completa
6	0,75:0,25:1	2,74	2,27	2,42	10,48	10,39	11,06	2	2,8	4,8
7	0,5:0,5:1	1,32	2,03	1,54	8,08	8,10	7,80	2,2	3,4	5,5
8	0,75:0,25:1,5	1,53	1,99	1,95	6,46	7,11	6,64	3,5	5,5	6,5
9	0,5:0,5:1,5	0,62	0,46	0,59	3,16	3,17	3,24	4	6,2	7
10	1:2	4,06	3,70	3,48	18,08	15,83	16,94	2,1	4,2	4,9
11	0,5:0,5:2	2,29	2,04	2,03	8,57	7,74	8,13	3	4,7	6,5
12	1:0,5	0,58	0,49	0,41	1,93	1,98	1,61	Reação completa	Reação completa	Reação completa
13	1:1	1,31	1,14	1,01	5,08	5,01	5,03	Reação completa	Reação completa	Reação completa
14	1:2	0,25	0,26	0,32	0,70	0,73	0,77	Reação completa	Reação completa	Reação completa

Argamassa	Traço Volumétrico	Máx. Tensão Flexão (MPa)			Máx. Tensão Compressão (MPa)			Profundidade de Carbonatação (mm)		
		28 dias	60 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias
15	0,75:0,25:1	2,91	2,63	2,81	10,94	12,53	13,23	2,20	4,60	5,00
16	0,5:0,5:1	1,34	1,94	2,04	7,71	7,82	8,06	1,60	5,10	5,50
17	0,75:0,25:1,5	0,89	0,89	0,88	4,71	4,56	4,40	3,20	5,90	8,40
18	0,5:0,5:1,5	0,78	0,73	0,79	3,43	3,07	4,08	3,90	9,50	9,60
19	1:0,5	2,77	2,19	3,07	13,83	15,63	14,49	2,00	2,60	4,60
20	1:1	1,57	2,03	1,92	8,23	8,00	8,29	2,60	4,70	6,30
21	1:2	0,79	0,66	0,64	2,26	2,10	2,22	6,10	10,00	13,90
22	0,75:0,25:1	1,06	1,42	1,16	4,92	5,23	5,40	2,00	4,00	5,10
23	0,5:0,5:1	1,15	1,00	0,95	3,42	3,56	3,58	2,90	5,10	6,20
24	0,75:0,25:1,5	0,96	0,94	0,96	3,55	3,40	3,39	3,60	6,10	8,40
25	0,5:0,5:1,5	0,56	0,61	0,57	1,78	1,85	1,88	3,90	8,10	9,70
26	1:2	0,49	0,59	0,57	1,58	1,30	1,14	Reação completa	Reação completa	Reação completa
27	1:2	0,47	0,55	0,64	1,60	1,38	1,46	Reação completa	Reação completa	Reação completa
28	1:2	0,73	0,75	0,68	2,28	2,45	2,21	7,00	10,10	Reação completa
12.R.0,5	1:0,5	2,02	1,55	1,37	7,88	7,31	6,81	Reação completa	Reação completa	Reação completa
13.R.0,5	1:1	1,38	1,16	1,36	4,65	4,87	4,66	Reação completa	Reação completa	Reação completa
14.R.0,5	1:2	0,69	0,78	0,96	1,43	1,67	1,88	Reação completa	Reação completa	Reação completa
19.R.0,5	1:0,5	3,77	3,38	4,53	15,94	15,31	14,34	1,00	2,40	4,90
20.R.0,5	1:1	2,42	1,89	2,47	7,72	8,95	7,18	2,90	4,20	6,40
21.R.0,5	1:2	0,72	0,79	0,82	1,82	2,11	1,90	6,80	8,20	Reação completa

Tabela comparativa final II

Tabela A.III. 2. Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água

Argamassa	Traço Volumétrico	Coeficiente de Capilaridade (kg/m ² .h ^{0,5})			Permeabilidade ao Vapor de Água, Wpv (kg.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹)	Coeficiente de Resistência à Difusão de Vapor de Água, μ
		28 dias	60 dias	90 dias		
1	1:2	15,00	14,57	15,17	1,64E-11	11,85
2	0,5:0,5:2	13,25	12,73	15,54	1,61E-11	12,01
3	1:0,5	6,49	7,80	7,60	1,37E-11	14,12
4	1:1	6,68	6,86	8,47	1,33E-11	14,57
5	1:2	7,96	7,96	7,96	1,27E-11	15,32
6	0,75:0,25:1	3,20	4,15	4,07	1,30E-11	14,89
7	0,5:0,5:1	4,39	5,69	5,64	1,24E-11	15,67
8	0,75:0,25:1,5	3,63	5,17	4,53	1,25E-11	15,47
9	0,5:0,5:1,5	10,09	11,14	10,89	1,26E-11	15,41
10	1:2	4,39	4,02	4,15	8,25E-12	23,50
11	0,5:0,5:2	5,57	7,16	7,09	7,97E-12	24,33
12	1:0,5	14,68	16,00	15,29	1,35E-11	14,36
13	1:1	8,54	9,05	9,47	1,33E-11	14,61
14	1:2	18,58	19,92	19,60	1,32E-11	14,66
15	0,75:0,25:1	3,80	4,72	4,65	1,26E-11	15,36
16	0,5:0,5:1	6,66	7,83	7,66	1,23E-11	16,73
17	0,75:0,25:1,5	8,51	8,95	11,03	1,35E-11	15,14
18	0,5:0,5:1,5	11,05	11,60	11,85	1,28E-11	16,41

Argamassa	Traço Volumétrico	Coeficiente de Capilaridade (kg/m ² .h ^{0,5})			Permeabilidade ao Vapor de Água, Wpv (kg.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹)	Coeficiente de Resistência à Difusão de Vapor de Água, μ
		28 dias	60 dias	90 dias		
19	1:0,5	4,89	5,68	5,50	6,98E-12	27,78
20	1:1	6,70	7,62	6,91	6,90E-12	28,10
21	1:2	16,46	16,48	15,88	6,02E-12	32,24
22	0,75:0,25:1	11,91	13,21	12,01	6,82E-12	28,46
23	0,5:0,5:1	13,38	15,31	14,80	6,56E-12	29,55
24	0,75:0,25:1,5	11,86	12,07	13,21	6,61E-12	29,34
25	0,5:0,5:1,5	16,64	17,57	17,76	6,44E-12	30,11
26	1:2	12,21	13,60	14,59	-	-
27	1:2	13,84	16,04	15,26	-	-
28	1:2	14,50	13,95	14,80	-	-
12.R.0,5	1:0,5	9,39	11,38	12,25	-	-
13.R.0,5	1:1	9,40	10,63	11,27	-	-
14.R.0,5	1:2	15,94	15,93	15,45	-	-
19.R.0,5	1:0,5	3,78	6,96	5,59	-	-
20.R.0,5	1:1	7,06	7,06	7,64	-	-
21.R.0,5	1:2	14,70	15,23	16,73	-	-